

Modelització i simulació d'un aerogenerador eòlic mitjançant *Simulink*

Marc Rodríguez Vidal

Treball de Final de Grau
Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials
Quadrimestre de primavera - Juny 2018



Director: Oriol Gomis Bellmunt
Departament d'Enginyeria Elèctrica - CITCEA
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Resum

Aquest treball de fi de grau tracta sobre el desenvolupament d'un model d'un aerogenerador eòlic i la seva posterior simulació mitjançant el programa informàtic *Simulink*, de MATLAB. L'aerogenerador que s'estudia és de velocitat variable i amb un generador d'inducció de gàbia d'esquirol connectat a la xarxa mitjançant un convertidor *back-to-back*.

En el projecte s'han presentat i descrit totes les equacions que defineixen el comportament del sistema mecànic i elèctric del generador, i s'ha dissenyat un control a cada costat del convertidor per tal d'extreure el màxim de potència de la turbina i assegurar el balanç de potència entre el costat de la màquina i el costat de la xarxa.

Finalment, mitjançant la simulació amb *Simulink* s'ha comprovat el correcte funcionament model estudiat i s'han analitzat els resultats per tal de proposar millores del model en un futur.

Índex

0	Prefaci	1
1	Introducció	2
1.1	Objectius del projecte	2
1.2	Abast del projecte	2
2	Descripció de l'aerogenerador	4
2.1	Turbina	5
2.2	Generador d'inducció	6
2.3	Convertidor de potència	8
3	Modelització del sistema mecànic	10
3.1	Model aerodinàmic	10
3.2	Tren de transmissió	12
4	Modelització del sistema elèctric	14
4.1	Transformada de <i>Park</i>	14
4.2	Motor elèctric	17
4.2.1	Equacions en la referència abc	18
4.2.2	Equacions en la referència qd0	20
4.2.3	Implementació al <i>Simulink</i>	23
4.3	Convertidor <i>back-to-back</i>	23
4.4	Xarxa elèctrica	27
5	Sistema de control de l'aerogenerador	30
5.1	Control del costat màquina	30
5.1.1	<i>Tip speed ratio</i> constant	30
5.1.2	Disseny del control	31
5.2	Control del costat xarxa	33
5.2.1	Phase Locked Loop - PLL	33
5.2.2	Regulador de voltatge DC	34
5.2.3	Control del <i>loop</i> de corrent	35
5.2.4	Control dels IGBTs	37
6	Simulació de l'aerogenerador	40
6.1	Comparativa entre l'aerogenerador sense control i amb control	40
6.2	Anàlisi de l'aerogenerador amb velocitat del vent constant	43
6.3	Comportament davant un graó de vent	51

7	Impacte mediambiental	58
8	Pressupost	60
8.1	Recursos informàtics	60
8.2	Recursos humans	60
8.3	Cost total	61
9	Conclusions	62
10	Agraïments	63
	Bibliografia	64

Índex de figures

2.1	Esquema de l'aerogenerador	4
2.2	Turbina d'eix horitzontal estàndar	5
2.3	Turbina d'eix vertical	6
2.4	Relació entre el parell d'una màquina d'inducció i la velocitat de gir del motor	7
2.5	Zones de treball de la màquina d'inducció en funció de la tensió i la freqüència	7
2.6	Màquina d'inducció de gàbia d'esquirol	8
2.7	Esquema d'un convertidor <i>back-to-back</i>	9
3.1	Esquema de blocs del model aerodinàmic muntat al <i>Simulink</i> . .	11
3.2	Gràfic que mostra la relació entre el <i>tip speed ratio</i> i el coeficient de Betz	12
3.3	Esquema de blocs del tren de transmissió muntat al <i>Simulink</i> . .	13
4.1	Sistemes de referència abc i qd0	15
4.2	Esquema de blocs de la transformada de <i>Park</i> construït al <i>Simulink</i>	16
4.3	Esquema de blocs de la transformada de <i>Park</i> inversa construït al <i>Simulink</i>	16
4.4	Esquema de la màquina d'inducció	17
4.5	Bloc del generador d'inducció de gàbia d'esquirol al <i>Simulink</i> . .	23
4.6	Esquema d'un convertidor <i>back-to-back</i>	24
4.7	Esquema de blocs del convertidor muntat amb IGBTs al <i>Simulink</i>	25
4.8	Esquema del model promitjat de la part de la xarxa	26
4.9	Esquema de blocs final del convertidor muntat al <i>Simulink</i>	26
4.10	Esquema equivalent de la xarxa elèctrica	27
4.11	Esquema de blocs de la xarxa construït al <i>Simulink</i>	29
5.1	Esquema de blocs del control del costat màquina construït al <i>Simulink</i>	31
5.2	Esquema de blocs del PLL construït al <i>Simulink</i>	33
5.3	Esquema de blocs del regulador de voltatge muntat al <i>Simulink</i> .	34
5.4	Esquema de blocs del control de corrent muntat al <i>Simulink</i> . . .	36
5.5	Gràfic que mostra com es generen els pulsos de control a partir de la comparació de valors	38
5.6	Esquema de blocs del generador de pulsos per als IGBTs muntat al <i>Simulink</i>	39

6.1	Comparativa de voltatges a l'estator	41
6.2	Comparativa d'intensitats a l'estator	42
6.3	Comparativa de potències actives	43
6.4	Comparativa de velocitats de rotació de la turbina	43
6.5	Velocitat de rotació de la turbina amb una v_{vent} de 9m/s	44
6.6	Velocitat de rotació del motor amb una v_{vent} de 9m/s	45
6.7	Comparativa de λ i λ_{opt} amb una v_{vent} de 9m/s	45
6.8	Potència activa subministrada pel generador a una v_{vent} de 9m/s	46
6.9	Intensitat DC al convertidor procedent del generador a una v_{vent} de 9m/s	46
6.10	Tensió del bus de contínua del generador a una v_{vent} de 9m/s	47
6.11	Voltatge al costat xarxa del convertidor a una v_{vent} de 9m/s	48
6.12	Voltatge al costat xarxa del convertidor ampliat a una v_{vent} de 9m/s	48
6.13	Comparativa d'intensitats i_q i i_q^* de la xarxa a una v_{vent} de 9m/s	49
6.14	Comparativa d'intensitats i_d i i_d^* de la xarxa a una v_{vent} de 9m/s	49
6.15	Intensitat injectada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s	50
6.16	Intensitat injectada a la xarxa ampliada a una v_{vent} de 9m/s	50
6.17	Potència activa aportada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s	51
6.18	Potència activa ampliada aportada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s	51
6.19	Velocitat de rotació de la turbina amb graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	52
6.20	Comparativa de λ i λ_{opt} amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	53
6.21	Freqüència del v_s^{abc} amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	53
6.22	Intensitat de la màquina amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	54
6.23	Potència activa de la màquina amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	54
6.24	Tensió del bus de contínua amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	55
6.25	Intensitat de la xarxa un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	56
6.26	Comparativa d'intensitats i_q i i_q^* de la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	56
6.27	Comparativa d'intensitats i_d i i_d^* de la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	57
6.28	Potència activa injectada a la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s	57

Índex de taules

3.1	Taula de valors del model aerodinàmic de l'aerogenerador	12
3.2	Taula de valors del tren de transmissió de l'aerogenerador	13
4.1	Taula de valors del generador d'inducció de l'aerogenerador	24
4.2	Taula de valors del convertidor de l'aerogenerador	27
4.3	Taula de valors de la xarxa a la qual es connecta l'aerogenerador	28
5.1	Taula de valors del PLL de l'aerogenerador	34
5.2	Taula de valors del regulador de voltatge de l'aerogenerador . . .	35
5.3	Taula de valors del loop de corrent de l'aerogenerador	37
8.1	Pressupost dels recursos informàtics	60
8.2	Pressupost dels recursos humans	61
8.3	Pressupost final	61

Índex de símbols

Alfabet grec

Γ_e	Parell elèctric desenvolupat pel motor
Γ_m	Parell mecànic desenvolupat pel motor
Γ_t	Parell mecànic desenvolupat per la turbina
λ	<i>Tip speed ratio</i> de la turbina
λ_{opt}	<i>Tip speed ratio</i> òptim de la turbina
λ_r	Flux concatenat al rotor
λ_s	Flux concatenat a l'estator
ω_e	Velocitat angular de la xarxa
ω_m	Velocitat angular de l'eix del motor
ω_r	Velocitat angular elèctrica del rotor
ω_t	Velocitat angular de la turbina
ρ	Densitat de l'aire
τ_{cl}	Constant de temps del controlador del <i>loop</i> de corrent
τ_{PLL}	Constant de temps del PLL
θ	Fase de la xarxa
θ_0	Angle de <i>pitch</i> de la turbina
θ_r	Fase del rotor
ξ	<i>Damping ratio</i> del controlador del PLL
ξ_E	<i>Damping ratio</i> del controlador del regulador de voltatge del bus

Alfabet llatí

A	Àrea escombrada per les aspes de la turbina
C	Capacitat dels condensadors
c_i	Coefficients de potència de la turbina

C_P	Coeficient de Betz
E_m	Pic de voltatge admès al PLL
E_{DC}	Tensió del bus de contínua
f	Freqüència de la xarxa
f_{nom}	Freqüència nominal de la màquina
i_l	Intensitat que circula per la xarxa
i_r	Intensitat que circula pels debanats del rotor
i_s	Intensitat que circula pels debanats de l'estator
i_{DCl}	Intensitat del costat xarxa del bus de contínua
i_{DCm}	Intensitat del costat màquina del bus de contínua
i_{DC}	Intensitat que surt del condensador del bus de contínua
J_{tot}	Moment d'inèrcia de la turbina
l_l	Inductància de la xarxa
L_m	Inductància magnetitzant de la màquina
L_r	Inductància del rotor de la màquina
L_s	Inductància de l'estator de la màquina
L_{lr}	Inductància de dispersió del rotor de la màquina
L_{ls}	Inductància de dispersió de l'estator de la màquina
L_{mr}	Inductància magnetitzant del rotor de la màquina
L_{ms}	Inductància magnetitzant de l'estator de la màquina
L_{rr}	Coeficient d'autoinductància del rotor de la màquina
L_{rs}	Valor màxim de la inductància mútua rotor-estator de la màquina
L_{sr}	Valor màxim de la inductància mútua estator-rotor de la màquina
L_{ss}	Coeficient d'autoinductància de l'estator de la màquina
M	Inductància magnetitzant de la màquina
n	Relació de transmissió de l'eix
p	Parells de pols de la màquina
P_C	Potència activa injectada al condensador
P_e	Potència elèctrica de la màquina
P_t	Potència de la turbina

P_w	Potència del vent
P_{DC}	Potència activa just abans del condensador del bus
P_{nom}	Potència nominal de la màquina
P_{xarxa}	Potència activa injectada a la xarxa
Q	Potència reactiva demanada a la xarxa
R	Radi de les aspes de la turbina
r_l	Resistència de la xarxa
r_m	Resistència magnetitzant de la màquina
r_r	Resistència del rotor de la màquina
r_s	Resistència de l'estator de la màquina
s	Paràmetre de lliscament de la màquina
T	Matriu de la transformada de <i>Park</i>
t	Temps
v_l	Voltatge del costat xarxa del convertidor
v_r	Voltatge als debanats del rotor
v_s	Voltatge als debanats de l'estator
v_z	Voltatge de la xarxa
V_{nom}	Tensió nominal de la màquina
v_{vent}	Velocitat del vent
V_{xarxa}	Tensió de línia de la xarxa

Capítol 0

Prefaci

La temperatura mitjana del planeta és la més alta dels últims 400 anys; en l'últim segle va augmentar $1,1^{\circ}\text{C}$. No sembla gaire, i en certa manera no ho és. El problema és que una part substancial d'aquest augment probablement es deu a l'activitat humana, en particular a l'ús de combustibles fòssils. Si realment aquesta n'és la causa, la temperatura seguirà en augment. Segons els càlculs més fiables, en els pròxims 50 anys l'augment serà d'entre $1,6$ i $5,5^{\circ}\text{C}$. Un augment de 10°C provocaria la desertització de moltes regions fèrtils i pertorbacions macroeconòmiques a tot el món [10].

Hi ha motius de sobres per estar alarmats. Però, tot i això, la gent no ho està. En el nostre dia a dia seguim disposant de gasolina pels cotxes i de gas natural per tenir calefacció i, a més a més, no hem tingut cap inundació per una pujada del nivell del mar ni tampoc hem viscut cap desastre climatològic en llocs on habitualment no n'hi ha. Aquest és el gran problema. Tothom n'ha sentit a parlar de l'escalfament global i l'efecte hivernacle, però el que la gent necessita són fets per conscienciar-se'n plenament, i quan aquests fets succeeixin, l'escalfament global ja no tindrà aturador. Els desastres naturals i, com a conseqüència, els polítics i econòmics, seran d'una magnitud tan gran que el nostre estat del benestar perillarà greument.

Però també hi ha motius per tenir esperança. En l'última dècada, els sistemes d'energia renovable i les noves tecnologies d'eficiència energètica s'han desenvolupat a una velocitat molt alta. Mentre una font d'energia neta i inesgotable no arribi, com és el cas de la fusió nuclear, el sector de la generació elèctrica ha de seguir investigant i innovant en l'àmbit de les fonts d'energia renovables per tal de substituir les fonts d'energia basades en combustibles fòssils amb l'objectiu de satisfer la demanda elèctrica d'un món cada vegada més poblat i més digitalitzat. Aquest treball pretén ser un primer pas per contribuir al progrés de l'energia eòlica, una tecnologia renovable amb un gran potencial de creixement i d'arribar a ser una de les fonts d'energia principals del planeta per davant dels combustibles fòssils.

Capítol 1

Introducció

Aquest document recull la modelització, el control i la simulació d'un generador eòlic mitjançant l'extensió de MATLAB anomenada *Simulink*.

En primer lloc, al capítol 2 es realitza una descripció bàsica dels components principals de l'aerogenerador. Tot seguit, en el capítol 3 es passa a modelitzar el sistema mecànic, format per la turbina i les seves pales i l'eix de transmissió ràpid i lent, connectat per la caixa de transmissió. A continuació, en el capítol 4, es modelitza el sistema elèctric format per la màquina d'inducció, el convertidor *back-to-back* i la xarxa, amb una prèvia explicació de la transformada de *Park* que s'utilitzarà molt sovint durant el capítol. Un cop modelitzat l'aerogenerador, es passa a dissenyar el control del mateix en el capítol 5, que està dividit entre el control del costat de la màquina d'inducció i el control del costat de la xarxa. Tot seguit, es mostren i s'analitzen els resultats de les simulacions realitzades amb el *Simulink* al capítol 6. Després es realitza un estudi de l'impacte mediambiental al capítol 7, i finalment s'extreuen conclusions de tot l'estudi i es busquen punts a millorar al capítol 9.

1.1 Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és aconseguir simular un aerogenerador de velocitat variable a partir d'un model que relacioni totes les seves parts des del moviment de la turbina fins la injecció de corrent a la xarxa, per tal d'analitzar el seu comportament en diverses condicions.

D'altra banda, es pretén analitzar en detall el comportament del convertidor *back-to-back*, la part de l'aerogenerador del qual n'és expert el centre on es realitza el treball, el CITCEA.

Finalment, l'últim objectiu del treball és aconseguir adquirir coneixements i experiència amb el *Simulink*, un programa de simulació basat en l'estructura de diagrames de blocs molt versàtil, amb un gran potencial i molt utilitzat en la majoria dels sectors de l'enginyeria industrial.

1.2 Abast del projecte

El projecte podria ser aplicat en moltes granges eòliques tant on-shore com off-shore. També es suggereix l'ús d'una màquina d'inducció de gàbia d'esquirol,

que probablement no és el generador més utilitzat a les turbines eòliques, per tal d'aportar una alternativa més econòmica i més robusta al generador d'inducció doblement alimentat, més utilitzat per a l'energia eòlica.

Capítol 2

Descripció de l'aerogenerador

En aquest capítol es comentaran conceptes bàsics relacionats amb les diferents parts de l'aerogenerador que més endavant es modelitzaran trobant les seves equacions que descriuen la seva dinàmica per tal d'afrontar el seu anàlisi amb més claretat.

L'esquema de l'aerogenerador que s'estudiarà es pot veure a la figura 2.1.

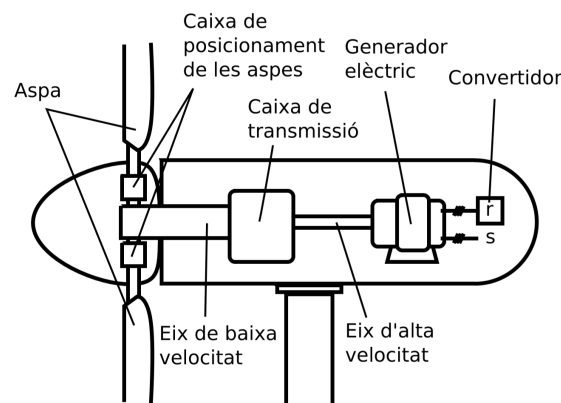


Figura 2.1: Esquema de l'aerogenerador

El moviment de les pales de la turbina a causa de la velocitat del vent es transforma en energia cinètica rotacional que es transmet a través del seu eix de baixa velocitat. Com que aquesta velocitat no és prou elevada per a que el motor generi una potència elèctrica considerable, s'utilitza una caixa de transmissió amb un tren d'engranatges que augmenta la velocitat angular, al qual s'hi acopla l'eix d'alta velocitat que va directament connectat al rotor del generador. El corrent elèctric generat s'injecta a la xarxa a través d'un convertidor per tal de transmetre d'una manera òptima i eficient la potència elèctrica.

2.1 Turbina

Com que aquest estudi es centra més en el sistema elèctric de l'aerogenerador, s'explicarà breument els tipus de turbina que existeixen. Bàsicament es classifiquen segons el seu eix de rotació: les turbines d'eix horitzontal i les turbines d'eix vertical [11].

Les turbines d'eix horitzontal són les que tradicionalment s'han utilitzat per bombejar aigua o generar energia a les zones rurals. Actualment, la majoria de turbines utilitzades per generar electricitat són d'eix horitzontal amb tres pales orientables de grans dimensions. Aquest tipus de turbina es segueix utilitzant degut a la seva excel·lent eficiència aerodinàmica. La possibilitat d'orientar les pales permeten a aquestes turbines aprofitar al màxim l'energia procedent del vent, així com la posició perpendicular a la direcció del vent de les pales, que reben més potència de rotació.



Figura 2.2: Turbina d'eix horitzontal estàndar

Les turbines d'eix vertical s'han començat a desenvolupar més recentment, i es solen implementar en zones més aïllades amb poca demanda elèctrica. La principal avantatge d'aquests tipus de turbina és que el seu eix vertical permet aprofitar el vent procedent de totes les direccions. També es pot construir tota la seva maquinària prop del terra, fet que possibilita la instal·lació d'elements pesants sense el perill que aquests estiguin molt elevats del terra, i per tant, el seu manteniment sigui molt més econòmic. Tot i això, degut a la seva proximitat al terra, solen aprofitar pitjor l'energia cinètica del vent, i la geometria complexa de les pales sol provocar fallades per fatiga, que en molts casos es tradueix en un trencament de les pales, fet que les fa menys robustes i segures.



Figura 2.3: Turbina d'eix vertical

En aquest treball s'ha considerat una turbina d'eix horitzontal degut a tots els avantatges que presenta i al seu ús majoritari en el sector de la generació d'energia elèctrica.

2.2 Generador d'inducció

La màquina d'inducció s'utilitza per transformar energia mecànica en energia elèctrica, o viceversa. Està formada per una part fixa, anomenada estator, i una part mòbil, anomenada rotor. Aquests tipus de màquines també reben el nom d'asíncrones, ja que tene una velocitat de funcionament inferior a la velocitat de sincronisme quan treballen com a motor, i una velocitat de funcionament superior a la de sincronisme quan treballen com a generador. Aquesta velocitat de sincronisme es defineix com la velocitat de rotació del camp magnètic en una màquina rotatòria. Aquest camp magnètic es pot expressar de la següent manera

$$\omega_m = \omega_s(1 - s) \quad (2.1)$$

On ω_m és la velocitat de rotació de la màquina, ω_s és la velocitat de sincronisme i s és el paràmetre de lliscament o *slip*. La velocitat de sincronisme es defineix com

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (2.2)$$

on f és la freqüència elèctrica i p és el nombre de parells de pols de la màquina.

Així doncs, atenent-se a aquests fenòmens, es pot utilitzar la màquina d'inducció com a generador elèctric si es connecta l'eix de la turbina al rotor de la màquina, i aquest eix gira amb una velocitat rotacional superior a la velocitat de sincronisme. En el següent gràfic (figura 2.4) es pot veure més clarament la relació entre el parell elèctric resultant de la màquina i la velocitat de gir del motor. Quan el parell és negatiu, aquest es generat per la màquina.

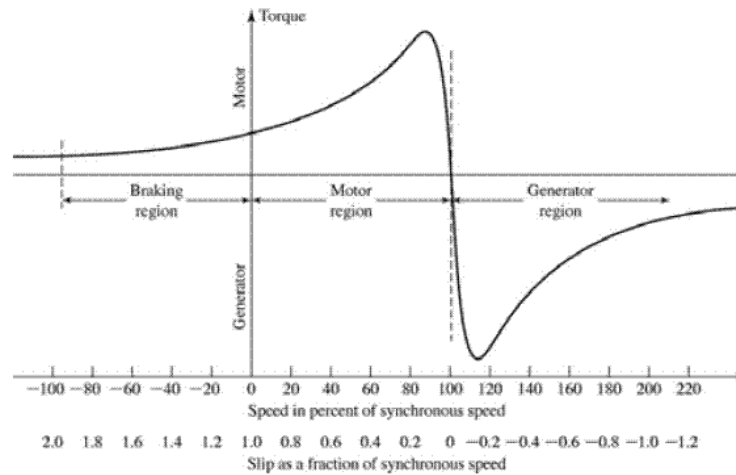


Figura 2.4: Relació entre el parell d'una màquina d'inducció i la velocitat de gir del motor

Existeixen tres zones de funcionament de la màquina d'inducció en funció de la tensió i la freqüència en la que treballen. Aquestes regions es veuen graficades a la figura 2.5. La regió lineal està compresa entre f_{min} i f_{nom} del motor. En aquesta regió el valor del flux magnètic es manté constant. A partir de la f_{nom} , s'entra a la regió de debilitament de camp, on la freqüència segueix augmentant i el voltatge es manté al V_{nom} de la màquina.

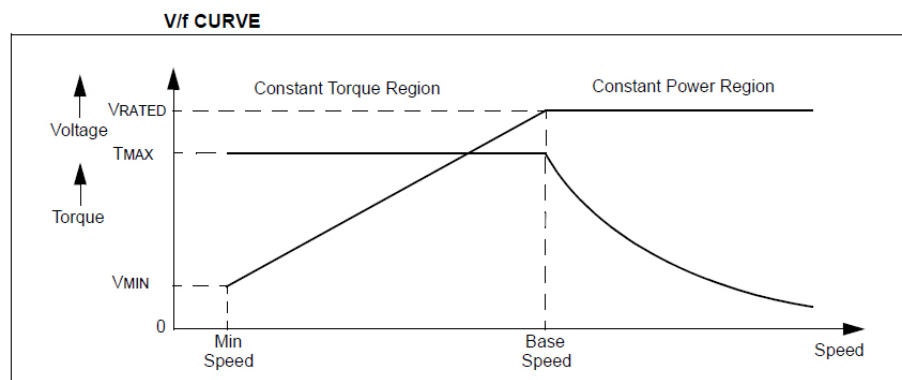


Figura 2.5: Zones de treball de la màquina d'inducció en funció de la tensió i la freqüència

La situació del punt de treball en la regió del gràfic de tensió i freqüència serà molt important a l'hora de dissenyar el control per la màquina.

En aquest estudi, s'ha escollit la màquina de tipus gàbia d'esquirol per implementar-la a l'aerogenerador. Aquesta màquina consta d'un cilindre, el rotor, muntat en un eix que internament conté unes barres conductores longitudinals d'alumini o coure connectats junts als extrems de manera que els anells que formen la gàbia estan curtcircuitats. El nom deriva de la semblança entre

aquesta gàbia d'anells i barres i la roda d'un hámster. Aquest tipus de motor és molt robust i més econòmic que moltes alternatives disponibles per aplicar a un aerogenerador [13] [1]. La figura 2.6 mostra com està construït aquest tipus de màquina.

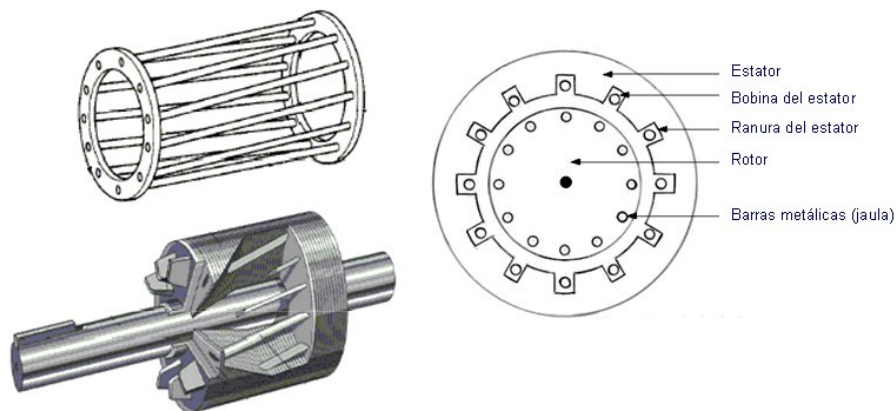


Figura 2.6: Màquina d'inducció de gàbia d'esquirol

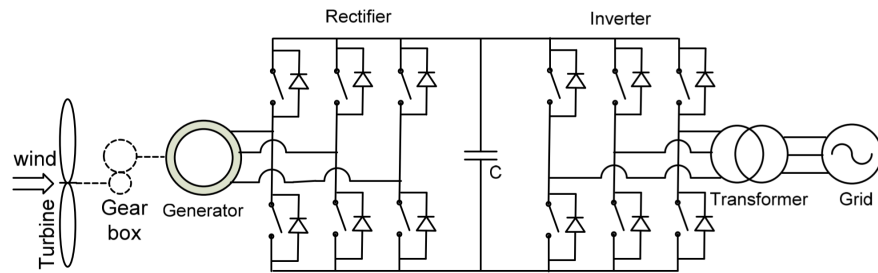
2.3 Convertidor de potència

Un convertidor de potència és un equip electrònic de potència que té com a objectiu la conversió d'un tipus d'energia elèctrica en un altre. En el cas de l'aerogenerador, el convertidor és CA/CA (corrent altern - corrent altern), amb freqüències elèctriques d'entrada i sortides diferents. Aquest tipus específic de convertidors CA/CA s'anomenen cicloconvertidors.

L'objectiu d'utilitzar aquest tipus de convertidors és d'assolir les condicions òptimes de tensió i freqüència al costat de la màquina i, per altra banda, subministrar l'electricitat a la xarxa en les condicions requerides (400V i 50Hz, per exemple). En cas de no utilitzar un convertidor, tal i com s'analitzarà al capítol 6, si es connecta la xarxa directament a la màquina, aquesta treballa molt per sota del seu punt òptim de treball, i per tant, no se li extreu tot el potencial possible. A part d'això, la màquina està molt subjecta als possibles canvis o fallades de la xarxa, fet que la faria molt poc autònoma.

El tipus de convertidor de potència triat per a l'aerogenerador és un convertidor *back-to-back*, utilitzat freqüentment en el sector de l'energia eòlica. Consisteix en dos inversors de fonts de tensió controlats mitjançant la tècnica de modulació d'amplada de polsos (*Pulse Width Modulation*, PWM) (figura 2.7).

Aquest convertidor està format per 12 IGBTs, 6 per cada costat que formen el rectificador i l'inversor, que estan connectats mitjançant un bus de tensió contínua. Aquest tipus de convertidor permet la bidireccionalitat del flux de potència, fet que ajuda a l'aerogenerador en la situació d'arrancada. El condensador que actua com a bateria al bus de contínua fa possible desacoplar el control dels dos grups de transistors, i d'aquesta manera poder treballar a tensions i freqüències diferents a cada costat, tal i com s'ha mencionat al principi

Figura 2.7: Esquema d'un convertidor *back-to-back*

de la secció. A més a més, el fet d'utilitzar la tècnica PWM ajuda a reduir en gran mesura els harmònics de freqüència i les seves pèrdues. En els últims anys, el seu ús ha augmentat considerablement, i moltes empreses del sector dels semiconductor han optat per fabricar el convertidor *back-to-back* com a un sol mòdul. Per tant, és un convertidor molt establert en el mercat amb uns preus molt competitius [6].

Capítol 3

Modelització del sistema mecànic

En aquest capítol es modelitzaran les diferents parts mecàniques de l'aerogenerador mitjançant el desgranament de les equacions que descriuen com es comporta la dinàmica de cada element. Primer de tot es presenta el model aerodinàmic de l'aerogenerador i es descriuen els diferents paràmetres que el componen. Amb l'ajuda d'aquest model, la correlació entre la potència extreta pel vent, la velocitat del vent i la velocitat de la turbina s'explicarà. En la següent secció es modelitza el tren de transmissió, explicant així el canvi de velocitat angular i parell mecànic que hi té lloc.

3.1 Model aerodinàmic

Les pales de l'aerogenerador es mouen gràcies al flux d'aire que hi incideix amb moviment, ja que provoquen una força a cada pala i l'energia cinètica del vent s'acaba convertint en energia cinètica rotacional de la turbina. Per tant, d'aquest fenomen físic es pot deduir que la potència que extraurà la turbina P_t dependrà directament de la potència del vent P_w . Aquesta relació de dependència es denota amb el coeficient C_P , que es descriurà més endavant [7].

Primer de tot, l'energia cinètica del vent es defineix com

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} v_w^3 = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (3.1)$$

Per relacionar-la amb la potència extreta per la turbina, s'utilitza el coeficient C_P

$$P_t = C_P P_w = \frac{1}{2} C_P \rho A v_w^3 \quad (3.2)$$

On C_P representa el coeficient de Betz, ρ representa la densitat de l'aire, A representa l'àrea escombrada per les pales de la turbina i v_w representa la velocitat del vent.

Havent vist on s'utilitza el coeficient de Betz, es procedeix a explicar com calcular-lo. El valor d'aquest paràmetre es pot interpretar com a un coeficient d'eficiència característic de cada turbina, i depèn a més del quocient entre la velocitat a la que es mou l'extrem de l'aspa i la velocitat del vent. Aquest

quocient λ s'anomena *tip speed ratio*. En el cas de les turbines amb aspes orientables, el coeficient de potència també depèn de l'angle θ_0 d'orientació (anomenat pas o *pitch*). El valor màxim d'aquest coeficient sol ser de 0,593 i es calcula mitjançant la següent funció analítica

$$C_p(\lambda, \theta_0) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \theta_0 - c_4 \theta_0^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 \frac{1}{\lambda}} \quad (3.3)$$

amb

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v_w} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \theta_0} - \frac{c_9}{1 + \theta_0^3} \quad (3.5)$$

on c_i és un conjunt de constants de valor major o igual a zero anomenades coeficients característics de la turbina; ω_t es la velocitat angular de la turbina i R és el radi de la turbina.

Per tal de simular el comportament aerodinàmic de la turbina al *Simulink*, s'ha implementat l'esquema de blocs de la figura 3.1.

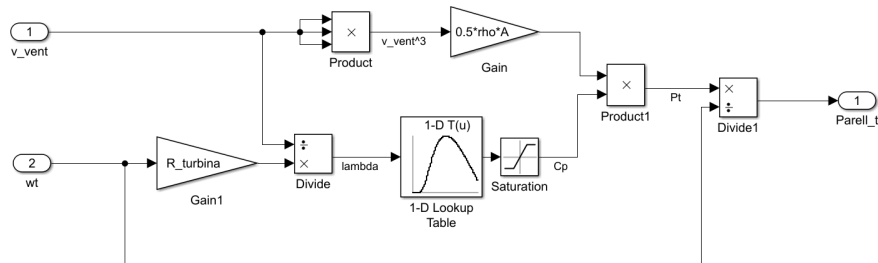


Figura 3.1: Esquema de blocs del model aerodinàmic muntat al *Simulink*

Les entrades del bloc són la velocitat del vent v_{vent} i la velocitat angular de la turbina ω_t . La sortida és el parell mecànic resultant desenvolupat per la turbina Γ_t .

El bloc *Lookup Table* s'encarrega de crear una funció d'una variable a partir d'uns vectors d'entrada i uns vectors de sortida. Aquesta funció serà implementada al senyal d'entrada, en aquest cas el *tip speed ratio* λ per tal de generar el senyal de sortida del coeficient de Betz C_P , limitat entre 0 i 1 per el saturador. La funció generada es pot veure a la figura 3.2.

La taula 3.1 mostra els valors que s'han utilitzat per a modelitzar l'aerogenerador.

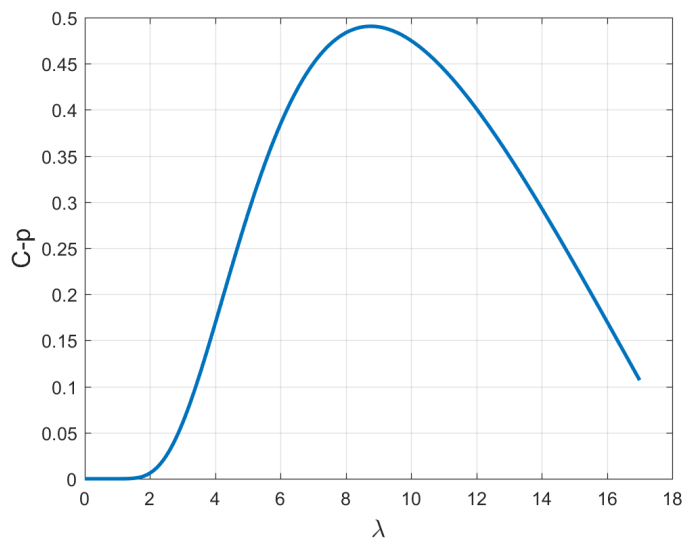


Figura 3.2: Gràfic que mostra la relació entre el *tip speed ratio* i el coeficient de Betz

Paràmetre	Valor
R	38 [m]
ρ	1,225 [kg/m ³]
θ_0	0
c_1	0,44
c_2	125
c_3	0
c_4	0
c_5	0
c_6	6,94
c_7	16,5
c_8	0
c_9	-0,002

Taula 3.1: Taula de valors del model aerodinàmic de l'aerogenerador

3.2 Tren de transmissió

El model de la transmissió descriu la dinàmica dels components mecànics que formen el tren de transmissió des de l'eix de la turbina fins l'eix del motor. El

tren està format per la pròpia turbina, l'eix de la turbina, la caixa reductora i l'eix del motor, concretament del rotor de la màquina elèctrica. La caixa reductora s'utilitza per aconseguir altes velocitats de l'eix del motor a partir de les baixes velocitats de l'eix de la turbina. Aquest element reductor es tindrà en compte quan es vulguin relacionar quantitats de la part de la turbina i la part del motor. Aquesta relació ve donada per la relació de transmissió n , que depèn dels engranatges que s'utilitzen i el nombre de dents que consten.

Per tal de modelitzar el tren de transmissió, s'utilitzarà el model simplificat d'una sola massa, on la dinàmica mecànica del conjunt de la turbina, la transmissió multiplicadora i l'eix del generador es modelen com una inèrcia mecànica sobre la que actuen dos parells, el de la turbina Γ_t i el del motor Γ_m . L'equació que descriu aquest model és la següent

$$\Gamma_t + n\Gamma_m = J_{tot} \frac{d}{dt} \omega_t \quad (3.6)$$

i

$$\omega_m = n\omega_t \quad (3.7)$$

on ω_m és la velocitat angular de l'eix del motor. En aquest model no es tindrà en compte la inèrcia del motor, ja que és considerablement menor al de la turbina.

Per tal de simular el tren de transmissió al *Simulink*, s'ha implementat l'esquema de blocs de la figura 3.3.

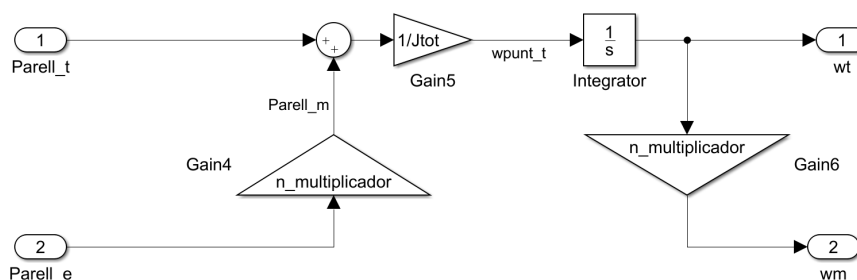


Figura 3.3: Esquema de blocs del tren de transmissió muntat al *Simulink*

Les entrades del bloc són el parell de la turbina Γ_t i el parell elèctric Γ_e . Les sortides són la velocitat angular de la turbina ω_t i la velocitat angular de l'eix del generador ω_m .

Els valors dels paràmetres del tren de transmissió utilitzats per modelitzar l'aerogenerador es poden veure a la taula 3.2.

Paràmetre	Valor
J_{tot}	$9 \cdot 10^6 [kgm^2]$
n	80

Taula 3.2: Taula de valors del tren de transmissió de l'aerogenerador

Capítol 4

Modelització del sistema elèctric

Aquest capítol tracta sobre la modelització de tots els components elèctrics de l'aerogenerador. Es presentaran i desenvoluparan les equacions que descriuen el comportament del motor elèctric, el convertidor AC/AC i la xarxa, i a partir d'aquestes equacions s'implementaran els esquemes de blocs corresponents al *Simulink*.

Abans d'entrar a estudiar cada sistema elèctric per separat, s'explicarà la transformada de *Park*, utilitzada en molts casos en aquest capítol. Tenint present aquesta eina matemàtica, s'explicaran tots els components que conformen la màquina d'inducció i com es pot relacionar el parell que rep el motor a través del rotor i corrent elèctric que es generarà a l'estator mitjançant aquests components. Tot seguit s'explicarà la utilitat del convertidor i com transformar freqüències elèctriques d'alterna mitjançant el bus de contínua a partir de les seves equacions. Finalment, s'analitzarà el comportament elèctric de la xarxa a partir d'un model reduït que té en compte la seva connexió al convertidor, i per tant, la conseqüent injecció de corrent.

4.1 Transformada de *Park*

Abans d'aprofundir en l'estudi de les equacions que governen el sistema elèctric de l'aerogenerador, començant per el motor d'inducció i acabant per la xarxa, convé explicar una transformació matemàtica que s'utilitzarà en molts casos per tal de simplificar la complexitat de càlculs que a priori es presenten amb les equacions en referència trifàsica *abc*. Aquesta transformació es coneix com a transformada de *Park* [3].

La transformada de *Park* consisteix en un sistema de referència rotatiu que gira a la mateixa velocitat angular que la pulsació angular elèctrica del sistema elèctric que s'està estudiant. D'aquesta manera, el valors sinusoidals que depenen del temps en la referència *abc* passen a ser valors constants en la nova referència *qd0*. La figura 4.1 mostra representativament el funcionament del nou sistema de referència.

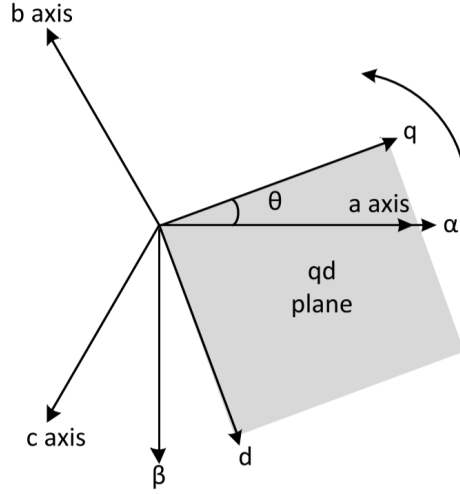


Figura 4.1: Sistemes de referència abc i qd0

La transformada de Park ve donada per

$$[x_{qd0}] = [T_{qd0}] [x_{abc}] \quad (4.1)$$

i la seva inversa

$$[x_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1} [x_{qd0}] \quad (4.2)$$

on x_{abc} és un vector trifàsic en la referència abc i x_{qd0} és un vector amb els valors transformats a la referència qd0.

La matriu de la transformada de Park $T(\theta)$ es pot expressar com

$$T(\theta) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

i la seva transformació inversa

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Per tal d'implementar la transformada de Park i la seva inversa al *Simulink*, s'han construït els esquemes de blocs de les figures 4.2 i 4.3 que realitzen aquestes funcions.

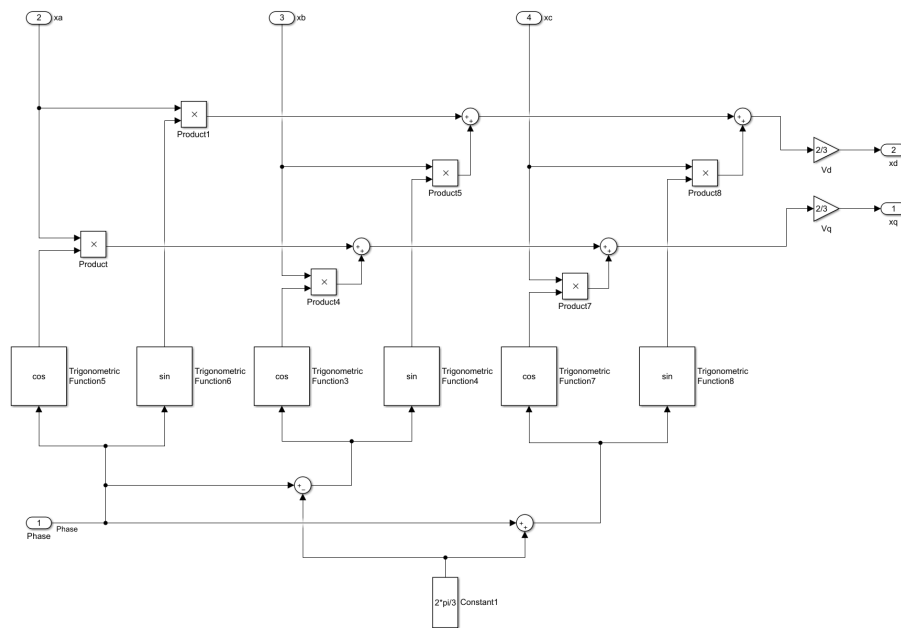


Figura 4.2: Esquema de blocs de la transformada de *Park* construït al *Simulink*

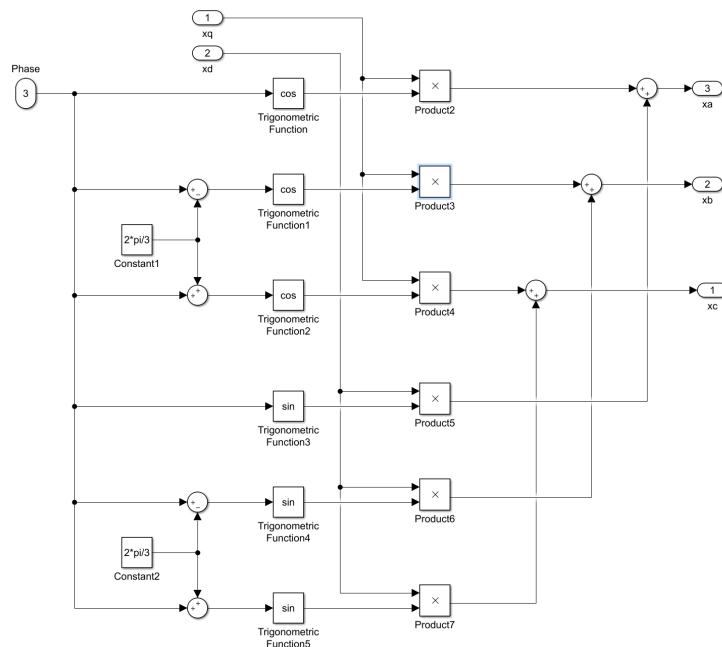


Figura 4.3: Esquema de blocs de la transformada de *Park* inversa construït al *Simulink*

4.2 Motor elèctric

En aquesta secció es descriuran les equacions que regeixen el comportament del motor elèctric de l'aerogenerador. El motor escollit per a l'estudi és un generador d'inducció de tipus gàbia d'esquirol (*Squirrel Cage Induction Generator*, SCIG). Aquest motor, com totes les màquines d'inducció trifàsiques, presenta tres debanats a al rotor i tres més a l'estator, tal i com es pot veure a l'esquema de la figura 4.4.

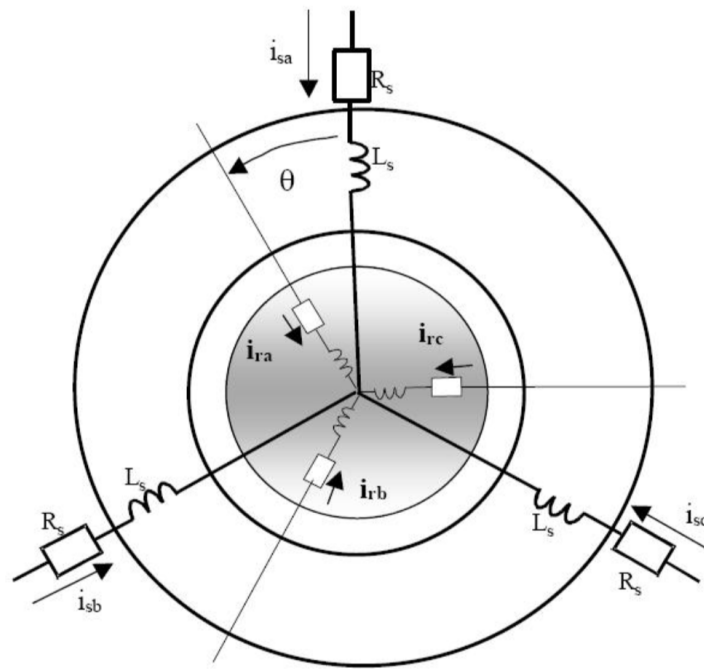


Figura 4.4: Esquema de la màquina d'inducció

Les equacions que es presentaran es poden dividir en dos grups: les equacions de voltatge i les equacions de parell [5]. Per tal de simplificar aquestes equacions, es consideraran les següents hipòtesis:

- Màquina d'inducció simètrica i equilibrada, amb un sol debanat al rotor.
- El material s'assumeix lineal, per tant la saturació del ferro queda descartada.
- La permeabilitat magnètica del ferro s'assumeix infinita en front a la permeabilitat magnètica de l'aire.
- Les pèrdues al ferro son negligibles.
- Els debanats del rotor i l'estator representen debanats distribuïts que sempre generen un camp magnètic sinusoidal a l'entreferro.

Degut a la densitat d'equacions matricials que presenta aquesta secció, es dividirà en dos sub-apartats: primer es presentaran les equacions en referència abc, i tot seguit s'utilitzarà la transformada de Park, explicada en la secció 4.1, per canviar la referència a qd0.

4.2.1 Equacions en la referència abc

Tenint en compte les hipòtesis presentades anteriorment i l'esquemàtic de la màquina d'inducció de gàbia d'esquirol, es considera el següent sistema d'equacions que descriu el comportament dinàmic del motor

$$\begin{Bmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^{abc} & 0 \\ 0 & r_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

On v_s^{abc} i v_r^{abc} són els voltatges trifàsics als debenats de l'estator i el rotor, respectivament; i_s^{abc} i i_r^{abc} són les intensitats trifàsiques que circulen per l'estator i el rotor, respectivament i λ_s^{abc} i λ_r^{abc} són els vectors dels fluxos concatenats de l'estator i el rotor, respectivament.

La relació entre els fluxos concatenats i els corrents de l'estator i el rotor venen donats per

$$\begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Cada terme de les equacions presentades fins ara representa un vector de tres dimensions o una matriu quadrada 3x3. Aquests vectors i matrius es poden representar de la següent manera

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, \quad v_r = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$r_s^{abc} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad r_r^{abc} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

On:

- θ_r Orientació del rotor del generador
- r_s Resistència dels debanats de l'estator
- r_r Resistència dels debanats del rotor
- L_{ss} Auto-inductància dels debanats de l'estator sense la dispersió
- L_{rr} Auto-inductància dels debanats del rotor sense tenir en compte la dispersió
- L_{sm} Inductància d'un debanat de l'estator deguda al flux que travessa l'entreferro
- L_{rm} Inductància d'un debanat del rotor deguda al flux que travessa l'entreferro
- L_{sr} Valor màxim absolut per les inductàncies L_{sm} i L_{rm}
- L_{ls} Inductància de dispersió de l'estator
- L_{lr} Inductància de dispersió del rotor

La teoria de conversió electromecànica permet utilitzar la següent equació

$$\Gamma_r = \frac{1}{2} [i]^t \frac{\delta [L(\theta_r)]}{\delta(\theta_r)[i]} \quad (4.13)$$

On Γ_r és el parell al rotor i $L(\theta_r)$ és la matriu d'inductàncies $L(\theta_r) = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix}$.

Normalment les màquines d'inducció estan dissenyades amb un nombre de pols més gran que 1. Això es pot entendre de manera teòrica com a un multiplicador ideal amb una relació de transmissió p entre l'angle de l'eix mecànic θ_m i del sistema elèctric

$$\Gamma_m = \frac{p}{2} [i]^t \frac{\delta[L(\theta_r)]}{\delta(\theta_r)[i]} \quad (4.14)$$

On p és el nombre de pols del motor.

Desenvolupant l'equació 4.14, es pot simplificar L_{ss} i L_{rr} , ja que no depenen de θ_r . Així doncs, les noves equacions són

$$\Gamma_m = \frac{p}{2} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix}^t \begin{bmatrix} 0 & N_{sr} \\ N_{sr} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

On

$$N_{sr}^{abc} = [N_{rs}^{abc}]^t = -L_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Per al motor que s'utilitza en l'aerogenerador d'aquest treball, el generador d'inducció de màquina d'esquirol, també conegut com a generador d'inducció de curtcircuit, els debanats del rotor es curtcircuiten. D'aquesta manera, l'única part del generador connectada a la xarxa és l'estator. Degut a la connexió del rotor, es pot fer la simplificació de $v_r^{abc} = 0$. Per tant, l'equació descrita a 4.5 queda de la següent manera

$$\begin{Bmatrix} v_s^{abc} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^{abc} & 0 \\ 0 & r_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

4.2.2 Equacions en la referència qd0

Per tal d'aplicar la transformada de *Park* a les equacions de la màquina d'inducció, és necessari definir una matriu que inclou dues matrius de *Park*. La primera transforma les variables de l'estator i la segona transforma les variables del rotor, ambdues en referència síncrona.

$$T(\theta, \theta - \theta_r) = \begin{bmatrix} T(\theta) & 0 \\ 0 & T(\theta - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Tenint en compte l'equació 4.5, aplicant-li la transformada de *Park* i definint els següents paràmetres

$$\begin{aligned} L_s &= L_{ss} - L_{sm} + L_{ls} \\ L_r &= L_{rr} - L_{rm} + L_{lr} \\ M &= \frac{3}{2} L_{sr} \end{aligned} \quad (4.19)$$

L'equació resultant és

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} v_s^{qd0} \\ v_r^{qd0} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}[Y]L_{ss}^{qd0}r_s^{qd0} & \dot{\theta}[Y]L_{sr}^{qd0} \\ (\dot{\theta} - \dot{\theta}_r)[Y]L_{rs}^{qd0} & (\dot{\theta} - \dot{\theta}_r)[Y]L_{rr}^{qd0} + r_r^{qd0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{qd0} \\ i_r^{qd0} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_{ss}^{qd0} & L_{sr}^{qd0} \\ L_{rs}^{qd0} & L_{rr}^{qd0} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} i_s^{qd0} \\ i_r^{qd0} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.20)$$

On:

$$r_s^{qd0} = r_s^{abc} \quad (4.21)$$

$$r_r^{qd0} = r_r^{abc} \quad (4.22)$$

$$L_{ss}^{qd0} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} + 2L_{sm} + L_{ls} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$L_{sr}^{qd0} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$L_{rs}^{qd0} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$L_{rr}^{qd0} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_{rr} + 2L_{rm} + L_{lr} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Desenvolupant totes aquestes expressions, es pot extreure una equació matricial del voltatge on la component x_0 només depèn del corrent i_0 i les seves derivades. Per una altra banda, els voltatges v_q i v_d només depenen dels corrents i les seves derivades. Així doncs, es poden expressar de la següent manera

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \\ v_{rq} \\ v_{rd} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} r_s & L_s \dot{\theta} & 0 & M \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s & -M \dot{\theta} & 0 \\ 0 & M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r & L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) \\ -M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & 0 & -L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Aplicant les mateixes hipòtesis que en l'equació 4.17, es pot escriure l'equació 4.28 com

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} r_s & L_s \dot{\theta} & 0 & M \dot{\theta} \\ -L_s \dot{\theta} & r_s & -M \dot{\theta} & 0 \\ 0 & M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r & L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) \\ -M(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & 0 & -L_r(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) & r_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Un cop obtingudes les equacions del voltatge en la referència qd0, es poden obtenir les equacions del parell si s'hi aplica la transformada de *Park*. Tenint en compte l'equació 4.15 s'obté

$$\Gamma_m = \frac{3}{2} p M (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (4.30)$$

4.2.3 Implementació al *Simulink*

Un cop explicades totes les equacions que descriuen el comportament del generador d'inducció de màquina d'esquirol, es procedeix a realitzar la seva implementació al *Simulink*.

Degut a la complexitat de totes les equacions que s'han presentat en aquesta secció i la dificultat de construir un diagrama de blocs mitjançant elements el més elemental possibles, s'ha recorregut al bloc pre-definit que ofereix *Simulink* a la seva llibreria *Simscape*. L'*skin* del bloc es pot veure a la figura 4.5.

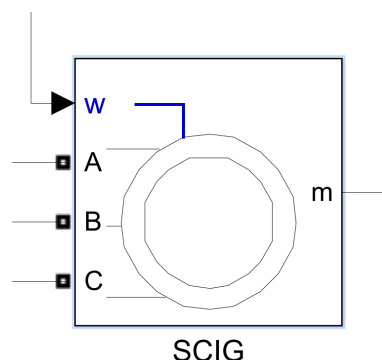


Figura 4.5: Bloc del generador d'inducció de gàbia d'esquirol al *Simulink*

El bloc consta d'una entrada de senyal mecànic, que pot ser el parell mecànic Γ_m o la velocitat de rotació de l'eix ω_m . En aquest estudi, tal i com s'ha modelat l'eix del motor en el bloc del tren de transmissió (figura 3.3), l'entrada de senyal és la velocitat de rotació de l'eix del motor. La sortida m proporciona senyals de mesura de la pròpia màquina. En aquest treball, s'ha utilitzat el senyal del parell elèctric Γ_e per tal d'incloure'l com a entrada al bloc del tren de transmissió (figura 3.3). Les connexions ABC són els cables que connecten l'estator amb l'exterior, que en aquest cas aniran connectats al convertidor de potència.

Els paràmetres que s'han d'introduir al bloc per tal de donar-li les característiques desitjades són la potència nominal P_{nom} , el voltatge nominal V_{nom} , la freqüència nominal f_{nom} , la resistència i la inductància de l'estator r_s i l_{ls} , la resistència i la inductància del rotor r_r i l_{lr} , la inductància mútua L_m , el parell de pols p i les condicions inicials de funcionament.

La taula 4.1 mostra els valors dels paràmetres del generador d'inducció de gàbia d'esquirol utilitzats per a modelitzar l'aerogenerador.

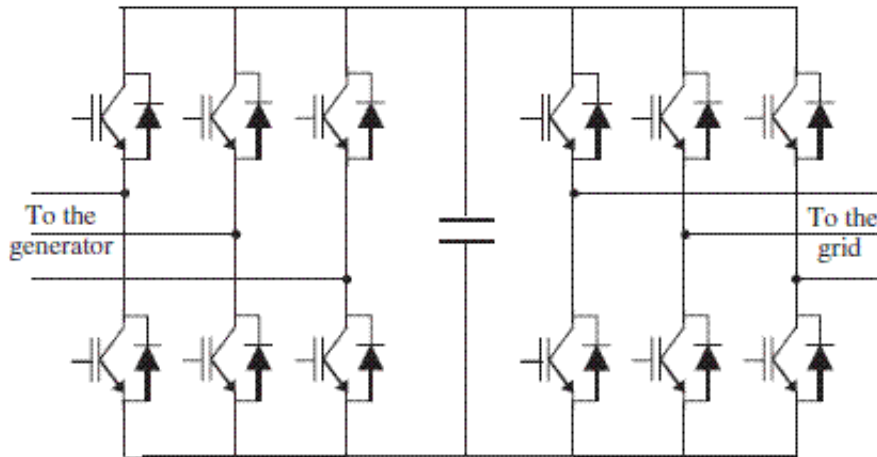
4.3 Convertidor *back-to-back*

En aquesta secció es presentaran les equacions utilitzades per model·lar el convertidor *back-to-back* i els diferents mètodes utilitzats per implementar-les. Aquest tipus de convertidor està format per 12 IGBTs, 6 per cada costat del convertidor, i d'un bus de contínua entre els dos grups d'IGBTs, format per una bateria, tal i com es pot veure a la figura 4.6. Aquest tipus de convertidor és molt útil per als aerogeneradors ja que es tracta d'una forma econòmica de transmetre altes potències entre dues xarxes amb freqüències elèctriques d'alterna diferents,

Paràmetre	Valor
L_{lr}	$0,3 [mH]$
L_{ls}	$0,4 [mH]$
L_m	$15 [mH]$
r_r	$9 [m\Omega]$
r_s	$5 [m\Omega]$
f_{nom}	$50 [Hz]$
P_{nom}	$2 [MW]$
V_{nom}	$1200 [V]$
p	2

Taula 4.1: Taula de valors del generador d'inducció de l'aerogenerador

sobretot gràcies a les altes freqüències de commutació que poden arribar a dur a terme els IGBTs.

Figura 4.6: Esquema d'un convertidor *back-to-back*

D'acord amb [3], i seguint les Lleis de Khirchoff, del node del bus de continuïtat es pot deduir la següent equació

$$i_{DCI} = i_{DCm} + i_{DC} \quad (4.31)$$

On i_{DCI} és la intensitat continuïta que va cap a la xarxa, i_{DCm} és la intensitat continuïta que ve de la màquina i i_{DC} és la intensitat continuïta que surt del condensador. La relació entre el corrent que circula pel condensador i el seu voltatge ve donada per la següent expressió

$$i_{DC} = C \frac{d}{dt} E_{DC} \quad (4.32)$$

On C és la capacitat del condensador i E_{DC} és la tensió del bus de contínua. Utilitzant l'equació 4.32 i arreglant l'equació 4.31 s'obté

$$\frac{d}{dt}E_{DC} = \frac{1}{C}(i_{DCl} - i_{DCm}) \quad (4.33)$$

Finalment, s'integra l'equació 4.33 per obtenir el voltatge del bus de contínua en funció dels corrents

$$E_{DC} = E_{DC0} + \frac{1}{C} \int_0^t (i_{DCl} - i_{DCm}) dt \quad (4.34)$$

Un cop descrit analíticament el funcionament del convertidor, es procedeix a implementar-lo mitjançant un esquema de blocs al *Simulink*. Per tal d'assimilar el comportament real del convertidor amb un grau elevat, es va fer una primera implementació utilitzant els 12 IGBTs dels que consta el convertidor, tal i com es mostra a la figura 4.7.

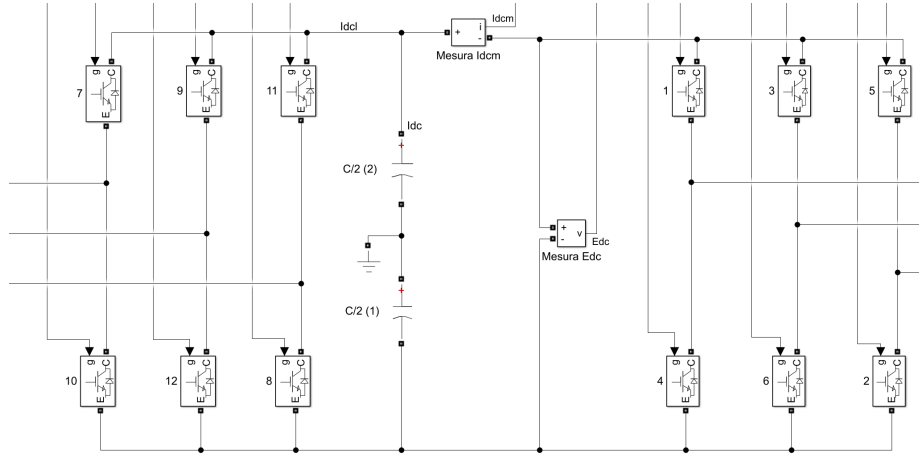


Figura 4.7: Esquema de blocs del convertidor muntat amb IGBTs al *Simulink*

Quan es va intentar implementar aquest esquema de blocs al *Simulink*, el grup d'IGBTs del costat de la màquina va donar problemes, ja que la intensitat que injectava el motor d'alterna de l'aerogenerador al bus de contínua tenia un valor molt discontinu, semblant al d'un senyal rectangular que assolía el zero amb una freqüència molt elevada, fet que desestabilitzava el regulador de voltatge del control de la xarxa (Secció 5.2.2). Això fa pensar que s'hauria d'haver utilitzat un filtre passabaixos, però davant la falta de temps per implementar un filtre d'aquestes característiques, es va optar per utilitzar un model promitjat al costat de la màquina, un model simplificat que ajuda a realitzar els càlculs per al control del convertidor.

El model promitjat es pot representar mitjançant l'esquema de la figura 4.8. S'ha de tenir en compte que en aquest esquema es modelitza la part de la xarxa del convertidor, però en el cas d'aquest treball el model promitjat s'aplica al costat de la màquina utilitzant la mateixa filosofia.

La part d'alterna es modelitza mitjançant tres fonts de tensió alterna controlades, que aplicaran la tensió de sortida de tot el bloc de control al motor

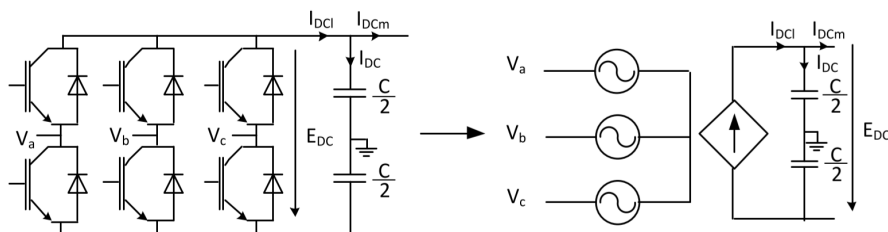


Figura 4.8: Esquema del model promitjat de la part de la xarxa

elèctric, tal i com farien les commutacions dels IGBTs. La part de contínua es modelitza mitjançant una font de corrent continu controlada, i simularà la intensitat en contínua que injecta a la xarxa el motor.

La relació entre les fonts de tensió alternes i la font de corrent continu ve donada per la següent equació

$$I_{DCm} = \frac{P_{ac}}{E_{DC}} \quad (4.35)$$

On P_{ac} és la potència activa d'alterna intercanviada entre el motor de l'aerogenerador i el convertidor.

La figura 4.9 mostra l'esquema de blocs del convertidor amb el costat màquina utilitzant el model promitjat i amb el costat xarxa utilitzant el model d'IGBTs.

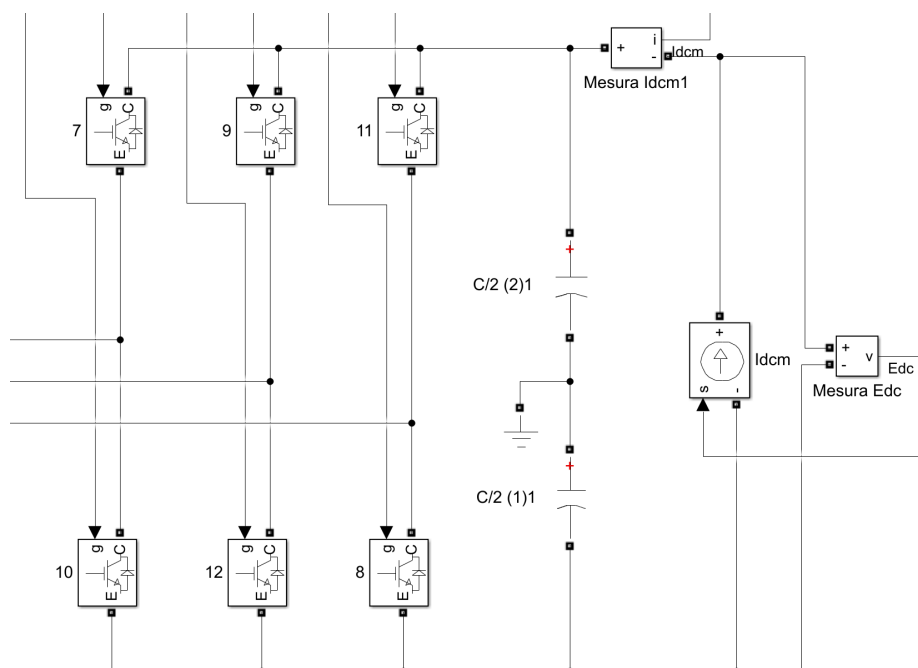


Figura 4.9: Esquema de blocs final del convertidor muntat al *Simulink*

La taula 4.2 mostra els valors utilitzats per a modelitzar el convertidor *back-to-back*.

Paràmetre	Valor
C	50 [mF]
E_{DC0}	6000 [V]

Taula 4.2: Taula de valors del convertidor de l'aerogenerador

4.4 Xarxa elèctrica

En aquesta secció es presentaran les equacions de la xarxa elèctrica seguint els passos de l'article [3]. Per tal d'obtenir unes equacions més senzilles, es reduirà el sistema a l'esquema equivalent presentat a la figura 4.10.

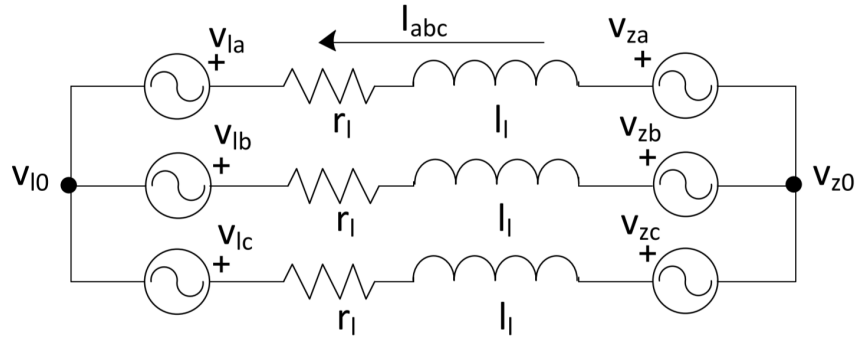


Figura 4.10: Esquema equivalent de la xarxa elèctrica

Aplicant les lleis de Khirchoff al circuit s'obtenen les següents equacions

$$\begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - (v_{l0} - v_{z0}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

On v_{za} , v_{zb} i v_{zc} representen els voltatges trifàsics de la xarxa en referència abc; v_{la} , v_{lb} i v_{lc} representen els voltatges trifàsics del convertidor en referència abc; i_a , i_b i i_c representen els corrents trifàsics injectats a la xarxa per part del convertidor en la referència abc; r_l representa la resistència de la connexió a la xarxa i l_l representa la inductància de la connexió a la xarxa. $v_{l0} - v_{z0}$ és la

diferència de potencial entre el convertidor i el neutre de la xarxa. Quan no hi ha cap conductor neutral, es pot assegurar que

$$v_{l0} - v_{z0} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot (v_z^{abc} - v_l^{abc}) \quad (4.37)$$

d'on es pot assegurar que per a sistemes equilibrats, la diferència es nul·la.

Un cop obtingudes aquestes equacions, per tal no tenir valors tant oscil·lants degut a la referència abc, es realitza la transformada de *Park*, explicada a la secció 4.1, a les equacions 4.36, obtenint les noves equacions en referència qd0

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & -l_l \omega_e \\ l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

On v_{zq} i v_{zd} són els voltatges de xarxa en la referència qd0; v_{lq} i v_{ld} són els voltatges del convertidor en la referència qd0; i_q i i_d són les intensitats injectades pel convertidor en la referència qd0 i ω_e és la velocitat angular elèctrica de la xarxa.

Per tal d'implementar el comportament descrit per aquestes equacions al *Simulink*, s'ha construït l'esquema de blocs de la figura 4.11.

Els valors dels paràmetres de la xarxa a la qual es connecta l'aerogenerador es mostren a la taula 4.3.

Paràmetre	Valor
l_l	10 [mH]
r_l	0,5 [Ω]
f	50 [Hz]
V_{xarxa}	400 [V]

Taula 4.3: Taula de valors de la xarxa a la qual es connecta l'aerogenerador

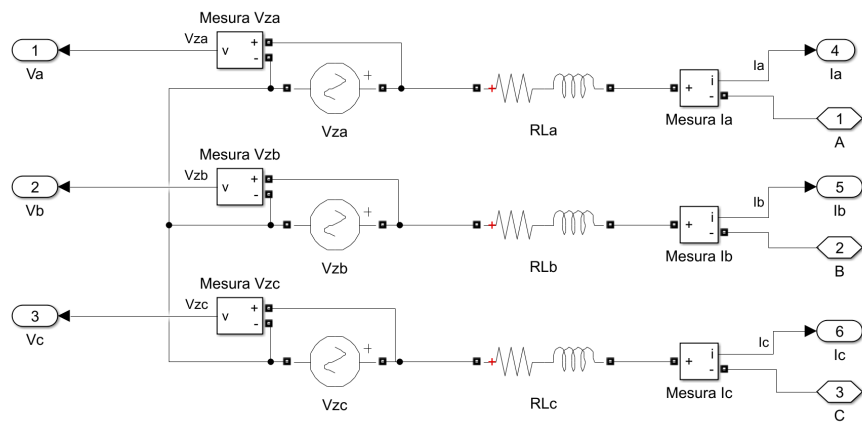


Figura 4.11: Esquema de blocs de la xarxa construït al *Simulink*

Capítol 5

Sistema de control de l'aerogenerador

En aquest capítol s'analitza el sistema de control per a l'aerogenerador de velocitat variable. Per al costat de la màquina, s'ha escollit un control escalar per regulació de tensió i freqüència de la màquina, mentre que per al costat de la xarxa s'ha escollit un control vectorial. S'estudiaran els dos mètodes de control per separat, ja que aquests funcionen independentment l'un de l'altre.

5.1 Control del costat màquina

Aquesta secció tracta sobre el control dissenyat al costat de la màquina per tal d'extreure el màxim de potència de la turbina. En primer lloc, es descriurà el procediment del *Tip speed ratio* constant, una tècnica per calcular el valor màxim de potència que la turbina pot arribar a extreure donada la velocitat del vent. A partir d'aquest càlcul, es dissenyarà el propi control que implementa aquesta tècnica, i es descriurà el sistema de blocs que l'assimila.

5.1.1 *Tip speed ratio* constant

El procediment del *tip speed ratio* constant consisteix en determinar una corba de parell òptima funció de la velocitat de gir [7]. Recordant l'equació 3.2, està clar que l'única variable que es pot controlar és C_P , ja que la velocitat del vent és totalment variable i incontrolable, l'àrea és determinada per la propia estructura de la turbina i la densitat és pràcticament constant. Sabent com es descriu aquest coeficient (equació 3.3), es pot veure que depèn de les variables *tip speed ratio* λ i l'angle d'orientació θ_0 . Com que l'objectiu és assolir el nivell màxim de potència, es regularà C_P de tal manera que s'arribi al seu punt màxim. Això s'aconsegueix derivant C_P respecte λ . El sistema es resol fixant l'angle d'orientació $\theta_0 = 0$.

$$\frac{dC_P}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} c_1 \left[c_2 \left(\frac{1}{\lambda + c_8 \theta_0} - \frac{c_9}{1 + \theta_0^3} \right) - c_3 \theta_0 - c_4 \theta_0^{c_5} - c_6 \right] e^{-c_7 \left(\frac{1}{\lambda + c_8 \theta_0} - \frac{c_9}{1 + \theta_0^3} \right)} = 0 \quad (5.1)$$

Avaluant en $\theta_0 = 0$ l'expressió 5.1 s'obté

$$\lambda_{opt}|_{\theta_0=0} = \frac{c_2 c_7}{c_2 c_7 c_9 + c_6 c_7 + c_2} \quad (5.2)$$

A partir d'aquest paràmetre òptim, es pot calcular la potència màxima que es pot extreure. En aquest estudi, el tipus de control que es farà és el de tensió-freqüència. Aquest disseny calcula el voltatge de consigna que haurà de transmetre al convertidor a partir de la freqüència elèctrica òptima de l'estator, tal i com es veurà en la següent sub-secció. En el cas que es vulgués aplicar un control vectorial, un control més sofisticat que per falta de temps no s'ha pogut dissenyar en aquest estudi, es calcularia el parell màxim a partir del *tip speed ratio* òptim λ_{opt} [2].

5.1.2 Disseny del control

Tal i com s'ha mencionat en l'apartat anterior, el control del costat màquina que s'ha dissenyat per l'aerogenerador és de tensió-freqüència en llaç obert. Aquest control busca mantenir el flux de l'estator constant i, d'aquesta manera, mantenir el valor del parell electromecànic constant i de valor màxim en estat estacionari [8].

El diagrama de blocs per construir el control es pot veure a la figura 5.1.

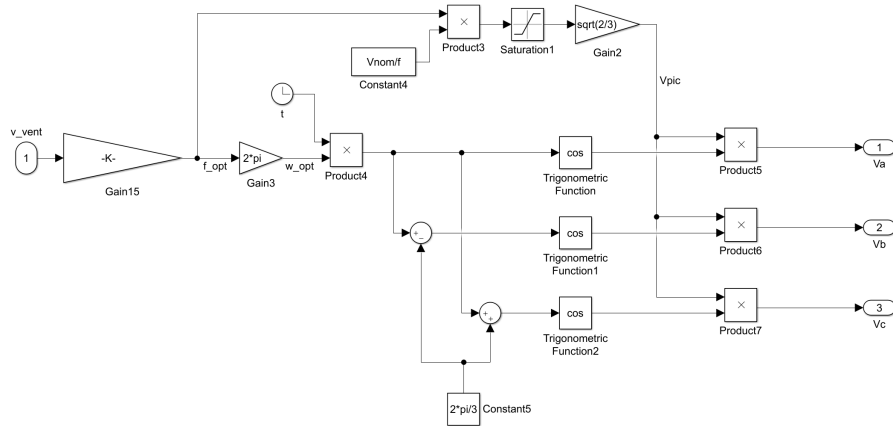


Figura 5.1: Esquema de blocs del control del costat màquina construït al *Simu-link*

L'entrada és el senyal de velocitat del vent v_{vent} , que podria ser mesurada amb un anemòmetre, i els senyals de sortida són els voltatges consigna de cada fase v_a, v_b, v_c que s'han d'aplicar al convertidor.

La constant K que apareix a l'esquema es dedueix a continuació. La consigna de freqüència òptima de treball s'obté a partir d'aplicar el criteri de potència màxima, explicat a la secció 5.1.1, a partir del qual s'extreu el *tip speed ratio* òptim λ_{opt} . Es pot relacionar amb la velocitat rotacional de la turbina amb la següent expressió

$$\omega_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v_{vent} \quad (5.3)$$

Sabent que la velocitat angular del generador d'inducció ω_m s'expressa com

$$\omega_m = \frac{\omega_r}{p} \quad (5.4)$$

Es pot relacionar ω_t i ω_r mitjançant la relació de transmissió n , i s'acaba obtenint la següent expressió

$$f_{opt} = \frac{\omega_{opt}}{2\pi} = \frac{\omega_{m_{opt}} p}{2\pi} = \frac{\omega_{t_{opt}} np}{2\pi} = \frac{\lambda_{opt} np}{2\pi R} v_{vent} \quad (5.5)$$

On es pot veure que el quocient que multiplica v_{vent} és la constant K de l'esquema de blocs de la figura 5.1.

Com que s'està treballant amb un generador elèctric, en tot moment s'ha de comprovar si s'està treballant en la regió de debilitament de camp o la regió lineal. En aquest últim cas ($f_{opt} \leq f_{nom}$), la relació $\frac{V}{f}$ es manté constant i dóna lloc al valor consigna de la constant del llaç de control m^* , definida com

$$m^* = \frac{V_{nom}}{f_{nom}} \quad (5.6)$$

on V_{nom} és el voltatge nominal de la màquina, f_{nom} és la freqüència nominal de la màquina i m^* és el pendent de la recta freqüència-tensió de la regió lineal.

Per tant, el voltatge que s'ha d'aplicar a l'estator a través de les commutacions del convertidor V_s s'expressa com

$$V_s = m^* f_{opt} \quad (5.7)$$

Per contra, si la màquina d'inducció està treballant a la regió de debilitament de camp ($f_{opt} > f_{nom}$), s'obté

$$V_s = V_{nom} \quad (5.8)$$

La diferència entre estar en una regió o una altra ve marcada per el bloc de saturació de l'esquema de blocs del control (figura 5.1), que limita el voltatge a V_{nom} .

Finalment, un cop obtingut el valor de tensió a l'estator es defineixen les tensions sinusoidals trifàsiques v_s^{abc}

$$\begin{aligned} v_{sa} &= \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \cos(2\pi f_{opt} t) \\ v_{sb} &= \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \cos\left(2\pi f_{opt} t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{sc} &= \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \cos\left(2\pi f_{opt} t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Tal i com s'ha comentat a la secció 4.3, aquestes tensions s'aplicaran directament a unes fonts de tensió ideals que estan connectades a l'estator davant la impossibilitat d'implementar un filtre degut a les excessives variacions de corrent continu que sortien de les commutacions dels IGBTs. Aquestes fonts de tensió ideals actuaran com els IGBTs i aplicaran d'una manera més precisa el voltatge consigna que surt d'aquest control dissenyat.

5.2 Control del costat xarxa

Aquesta secció es basa en el disseny del control vectorial del costat del convertidor connectat a la xarxa. Aquest tipus de control permet a l'usuari fixar uns valors consigna de voltatge del bus del convertidor E_{DC}^* i de potència reactiva Q^* lliurada a la xarxa. El sistema de control s'encarregarà de regular el voltatge del convertidor mitjançant la commutació dels 6 IGBTs, per tal d'assolir valors consigna als estats transitoris i de mantenir-los durant els estats estacionaris [2] [3].

El sistema de control està format per quatre grans blocs, cada un amb una funció específica, descrits en els següents subapartats.

5.2.1 Phase Locked Loop - PLL

El *Phase Locked Loop* o PLL serveix per computar la velocitat angular i la fase de la xarxa, necessaris per realitzar la transformada de Park i per al *loop* de corrent. La figura 5.2 presenta l'esquema de blocs construït al *Simulink*.

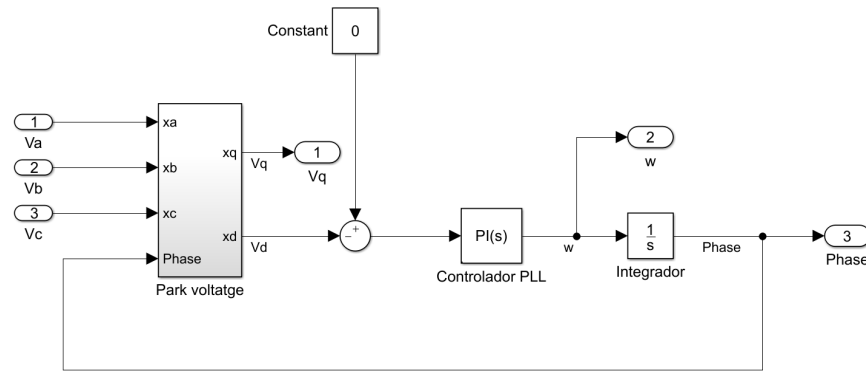


Figura 5.2: Esquema de blocs del PLL construït al *Simulink*

Les entrades del bloc són les mesures dels voltatges en la referència abc V_{abc} . A aquests se'ls hi aplica la transformada de Park per tal d'obtenir els voltatges en la referència $qd0$ v^{qd} .

L'error de mesura de v_d entra com a senyal del controlador PI del PLL. Per tal de dissenyar el controlador, es considera el següent sistema de segon ordre en el domini de Laplace

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{2s\xi\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2s\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (5.10)$$

On $\hat{\theta}$ és la fase de la xarxa estimada i θ és la fase real de la xarxa.

El controlador del PLL es pot expressar genèricament de la següent manera

$$K_f(s) = K_p \left(\frac{\frac{1}{\tau_{PLL}} + s}{s} \right) \quad (5.11)$$

on τ_{PLL} és la constant de temps del controlador.

Així doncs, K_p i τ_{PLL} es poden obtenir mitjançant les següents equacions

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{E_m} \quad (5.12)$$

$$\tau_{PLL} = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (5.13)$$

on E_m és el valor del pic de voltatge admès, ξ és el *damping ratio* i ω_n és la velocitat angular elèctrica.

La sortida del controlador és la velocitat angular estimada, i per tal d'obtenir la fase estimada, el senyal ha de passar per un integrador pur.

La taula 5.1 presenta els valors escollits per al PLL de l'aerogenerador.

Paràmetre	Valor
ξ	0,707
ω_n	$2\pi 50$ [rad/s]
E_m	820 [V]

Taula 5.1: Taula de valors del PLL de l'aerogenerador

5.2.2 Regulador de voltatge DC

El regulador de voltatge DC és necessari per controlar el voltatge del bus de tensió contínua assegurant el balanç de potència entre la font de generació, en aquest cas la màquina de la turbina, i la potència injectada a la xarxa. El senyal de sortida d'aquest bloc serà la intensitat de referència i_q^* per al *loop* de corrent.

L'esquema de blocs muntat al *Simulink* és el que es mostra a la figura 5.3. Les dues entrades són la tensió consigna del bus de contínua al quadrat E_{DC}^{2*} i

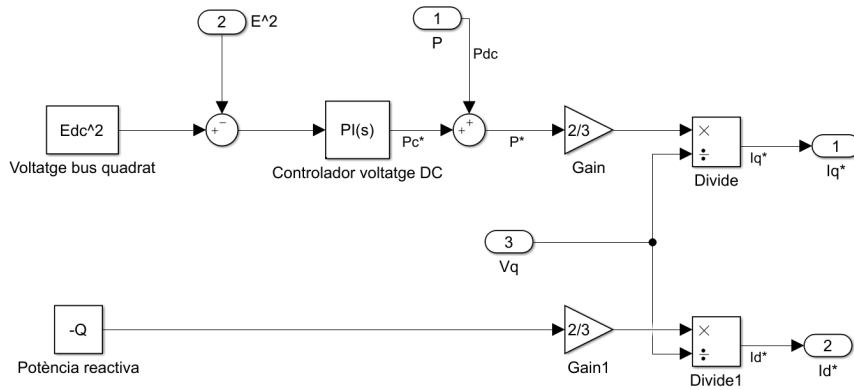


Figura 5.3: Esquema de blocs del regulador de voltatge muntat al *Simulink*

la tensió mesurada del bus de contínua al l'quadrat E_{DC}^2 . S'agafa els valors al quadrat perquè són proporcionals a l'energia emmagatzemada als condensadors. La computació de l'error és l'entrada del controlador, que calcula la potència activa que s'ha d'injectar al condensador P_C^* . Per tant, la potència activa de referència al convertidor serà $P^* = P_C^* + P_{DC}$, on P_{DC} és la potència activa mesurada abans del condensador.

La variable de control $W = E^2$ s'utilitza per dissenyar el PI del bloc. La potència del capacitor P_C es pot expressar en el domini de Laplace com

$$P_C(s) = \frac{1}{2} s C W(s) \quad (5.14)$$

El controlador PI que s'utilitza G_{cDC} té la següent forma

$$G_{cDC}(s) = K_{pDC} + \frac{K_{iDC}}{s} \quad (5.15)$$

La funció de transferència de llaç tancat es pot expressar com

$$\frac{W(s)}{W^*(s)} = \frac{s K_{pDC} + K_{iDC}}{\frac{1}{2} s^2 C + s K_{pDC} + K_{iDC}} \quad (5.16)$$

que té la forma de

$$\frac{W(s)}{W^*(s)} = \frac{2s\xi_E\omega_E + \omega_E^2}{s^2 + 2s\xi_E\omega_E + \omega_E^2} \quad (5.17)$$

Així doncs, les constants del controlador PI es calculen així

$$K_{pDC} = C\xi_E\omega_E \quad (5.18)$$

$$K_{iDC} = \frac{C\omega_E^2}{2} \quad (5.19)$$

on ξ_E és el *damping ratio* desitjat i ω_E és la velocitat angular desitjada.

És important remarcar que el *loop* de voltatge ha de ser substancialment més lent que el control de corrent per tal d'assegurar una resposta estable del sistema.

Els valors escollits per al regulador de voltatge de l'aerogenerador es mostren a la taula 5.2.

Paràmetre	Valor
ξ_e	$1/\sqrt{2}$
ω_n	$2\pi/0,002 [rad/s]$

Taula 5.2: Taula de valors del regulador de voltatge de l'aerogenerador

5.2.3 Control del *loop* de corrent

La idea aquí és que els corrents de referència computats porten a unes potències activa i reactiva desitjats, ja que han estat calculats mitjançant valors de potència de referència. Així doncs, el corrent es controlat comparant els valors reals mesurats i els valors desitjats (calculats al regulador de voltatge) en un

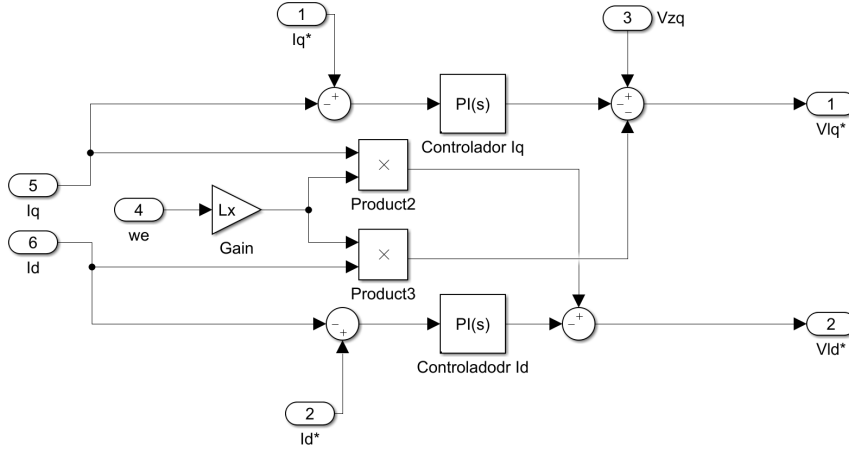


Figura 5.4: Esquema de blocs del control de corrent muntat al *Simulink*

llaç tancat que calcularà quin voltatge s'ha d'aplicar al convertidor. La figura 5.4 mostra la implementació en esquema de blocs al *Simulink* del control de corrent.

Per tal de dissenyar el controlador s'ha de recórrer a les equacions en referència qd0. Com que el PLL s'utilitza com s'ha mencionat a la secció 5.2.1 i, per tant, $v_{zd} = 0$ i les equacions prenen la següent forma

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \dot{\theta} \\ -l_l \dot{\theta} & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Estudiant detalladament aquestes equacions, es pot observar que el voltatge i el corrent en referència qd0 estan emparellats. Això pot interferir en el disseny dels controladors individuals per tal de controlar per separat les dues components. Per tant, per tal de solucionar aquest problema, les components s'han de desemparellar per tal que es puguin controlar individualment

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

on \hat{v}_{lq} i \hat{v}_{ld} representen les sortides dels controladors individuals de corrent i v_{lq} i v_{ld} representen els voltatges aplicats pel convertidor.

Si s'apliquen aquests termes a l'equació dels voltatges 5.20, s'obté la següent expressió

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Tot seguit, s'aplica la transformada de Laplace a aquestes equacions, de les quals se'n deriven les següents funcions de transferència

$$\frac{i_q(s)}{\hat{v}_{lq}(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l} \quad (5.23)$$

$$\frac{i_d(s)}{\hat{v}_{ld}(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l} \quad (5.24)$$

A partir d'aquí, els PIs es poden dissenyar utilitzant la tècnica *Internal Model Control*, de la qual en resulta el següent controlador

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (5.25)$$

A més a més, la funció de transferència de llaç tancat té la següent forma

$$T(s) = \frac{i_{lq}(s)}{i_{lq}^*(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5.26)$$

Per tant, les constants del controlador es poden calcular així

$$K_p = \frac{l_l}{\tau_{cl}} \quad (5.27)$$

$$K_i = \frac{r_l}{\tau_{cl}} \quad (5.28)$$

on τ_{cl} és la constant de temps del *loop* de corrent del sistema elèctric. Aquesta constant s'ha d'escollir considerant les restriccions físiques del convertidor. Normalment es defineix un nombre de vegades (10 per exemple) més ràpid que la freqüència de commutació del convertidor.

Tal i com s'ha mencionat abans, la resposta temporal del *loop* de corrent està configurada de tal manera que sigui més ràpida que el regulador de voltatge del bus de contínua, per tal d'assegurar l'estabilitat del sistema.

La taula 5.3 mostra els valors dels paràmetres del *loop* de corrent de l'aerogenerador.

Paràmetre	Valor
τ_{cl}	1 [ms]

Taula 5.3: Taula de valors del *loop* de corrent de l'aerogenerador

5.2.4 Control dels IGBTs

Així com a la part de la màquina s'ha utilitzat un model promitjat i, per tant, el senyal de tensió que surt del control s'aplica directament a les fonts de tensió d'alterna, en el costat de la xarxa s'ha de dissenyar un mètode de control per als IGBTs de tal manera que les commutacions que realitzin acabin aplicant el senyal de voltatge de sortida del control del *Pulse Width Modulation* o PWM (modulació de pulsos per amplitud) [4].

Aquesta tècnica s'utilitza per codificar un senyal contínua en un senyal per pulsos, i és àmpliament utilitzada en l'electrònica de potència, concretament als convertidors. Mitjançant aquest procediment, el que es fa és comparar el senyal sinusoidal de voltatge de sortida del control amb un senyal triangular d'alta freqüència mitjançant una porta lògica de comparació. En els trams que la senyal sinusoidal té un valor més elevat que el senyal triangular, la porta lògica de comparació genera un senyal de sortida de valor alt o 1. En cas contrari, es

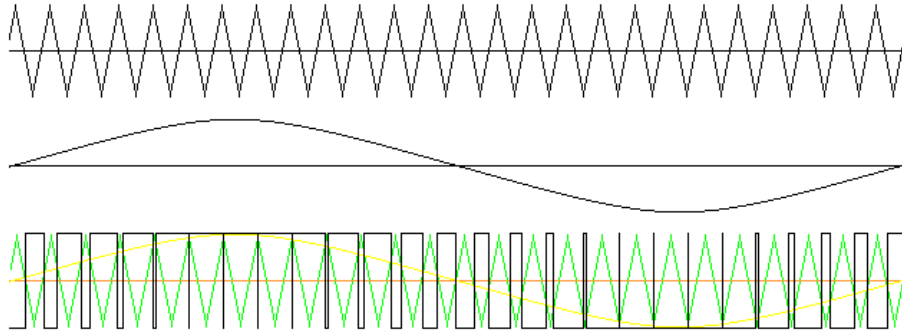


Figura 5.5: Gràfic que mostra com es generen els pulsos de control a partir de la comparació de valors

genera un senyal de sortida de valor baix o 0. Aquest fenomen es pot entendre millor i d'una manera més visual veient la figura 5.5.

Aquests pulsos són els que controlaran els IGBTs, que en cas de rebre un senyal de valor alt, tancaran l'interruptor, mentre que si reben un senyal de valor baix, obriran l'interruptor. En aquest cas, l'amplitud de el senyal triangular ha de ser de $\pm \frac{E_{DC}}{2}$, i la freqüència de commutació serà de 50kHz, molt alta per tal de tenir uns rissats mínims.

La implementació d'aquesta tècnica al *Simulink* es pot apreciar a la figura 5.6.

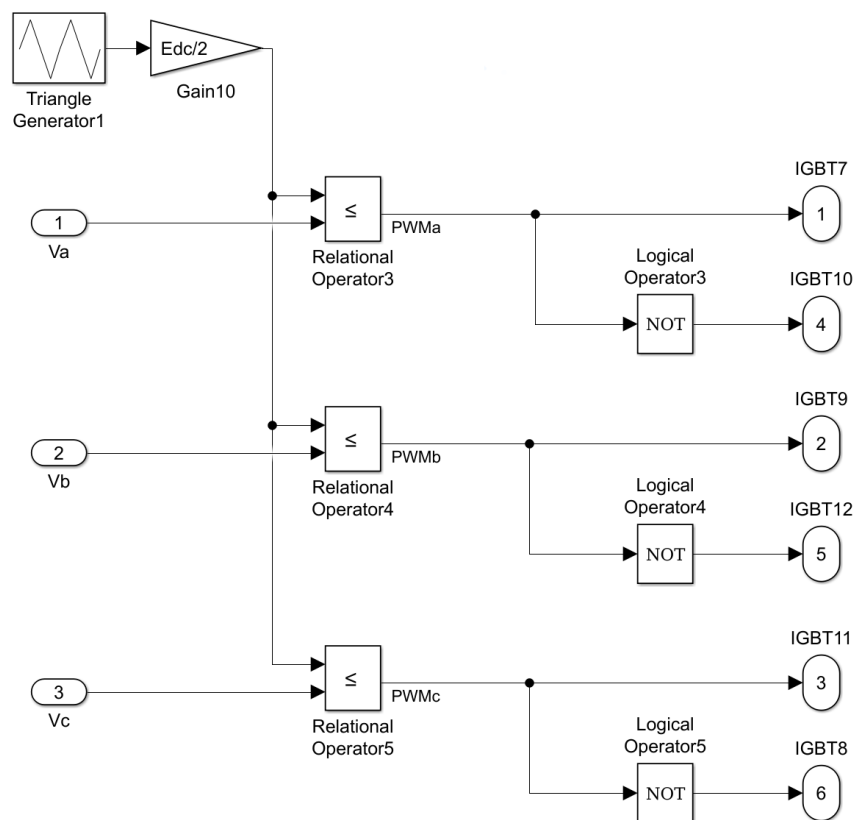


Figura 5.6: Esquema de blocs del generador de pulsos per als IGBTs muntat al *Simulink*

Capítol 6

Simulació de l'aerogenerador

En aquest capítol es descriuran i analitzaran les simulacions que s'han dut a terme en aquest estudi. Les simulacions es divideixen en tres grans blocs: el primer es tracta d'una comparativa de l'aerogenerador connectat directament a la xarxa i connectat al convertidor utilitzant el control dissenyat al capítol 5. El segon bloc es tracta de l'anàlisi detallat de l'aerogenerador amb el convertidor amb una velocitat del vent constant. L'últim es tracta de l'anàlisi de la resposta de l'aerogenerador davant un graó de vent.

6.1 Comparativa entre l'aerogenerador sense control i amb control

En aquest primer estudi es mostraran els resultats gràfics per entendre i verificar els avantatges que comporta utilitzar un convertidor *back-to-back* per tal d'incrementar la potència activa aprofitada del generador d'inducció de la turbina eòlica.

La simulació sense control s'ha realitzat amb el la màquina asíncrona connectada directament a una xarxa trifàsica de 400V de tensió i 50Hz de freqüència elèctrica, mentre que la simulació amb control s'ha utilitzat tot l'esquema de blocs que s'ha anat descrivint durant tot el document, i del qual se'n pot veure una imatge a l'annex. En ambdues simulacions, la velocitat del vent ha estat de 11m/s, la velocitat angular de la turbina ha estat de 2,4rad/s.

En primer lloc, a la figura 6.1 es pot veure clarament que els voltatges aplicats a l'estator de la màquina són diferents, ja que en el cas sense control està connectat a 400V i en el cas amb control el convertidor està aplicant una tensió superior per tal d'aconseguir més potència. En el cas de la intensitat, a la figura 6.2 es pot veure que en els dos casos hi ha un estat transitori on les intensitats trifàsiques tenen amplituds diferents i acaben sent iguals a l'estat estacionari. El transitori en el cas del control és més brusc. Finalment, cal dir que a l'estat estacionari les intensitats són molt semblants.

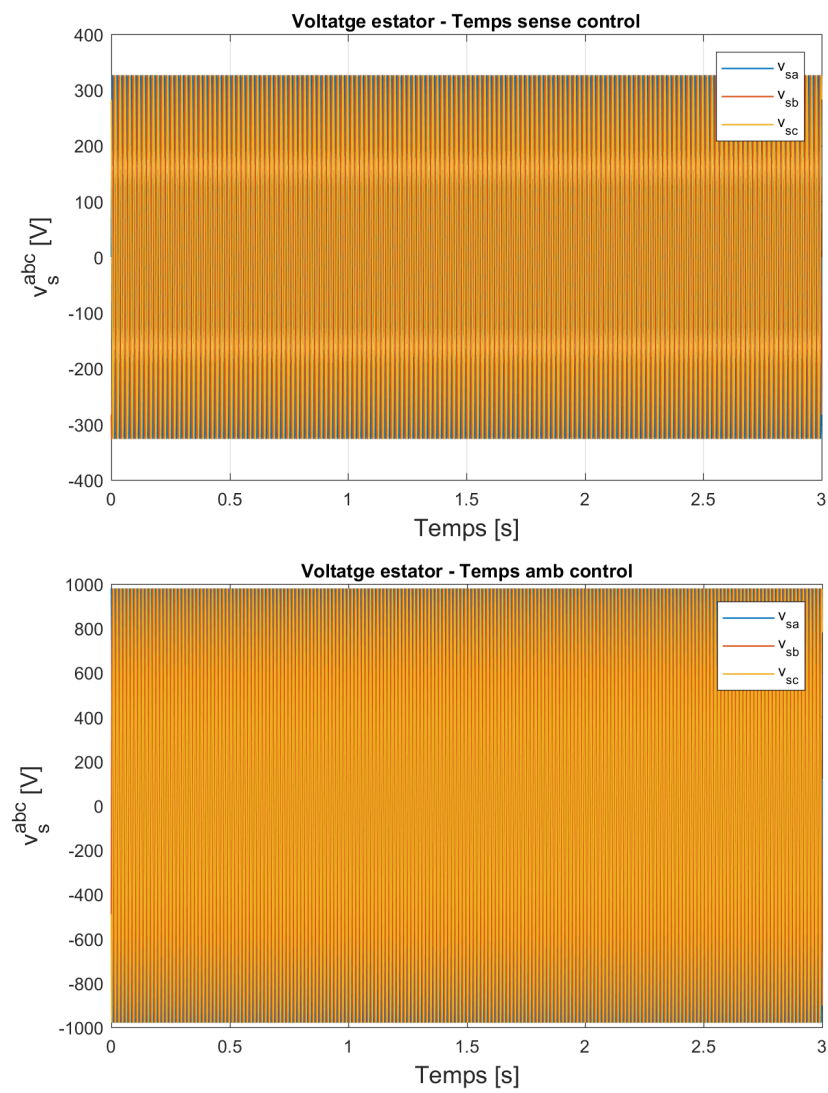


Figura 6.1: Comparativa de voltatges a l'estator

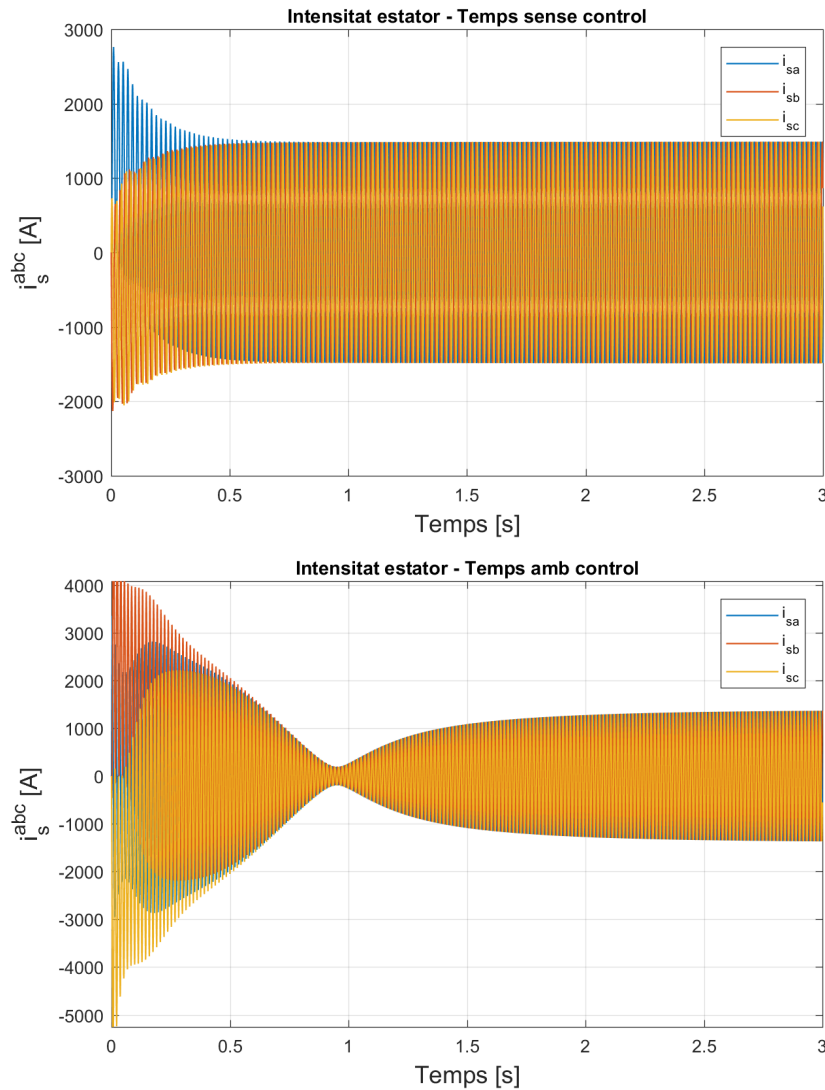


Figura 6.2: Comparativa d'intensitats a l'estator

Per tal de veure realment la diferència de potències subministrades pel generador, s'ha realitzat un gràfic on es comparen les dues potències actives que proporcionen les dues opcions. Aquest gràfic és la figura 6.3, on es pot veure que l'opció de control entrega molta més potència elèctrica a la xarxa, tot i que al principi necessita potència de la xarxa per tal d'arribar a la velocitat de rotació òptima.

Per últim, és interessant comparar la diferència de velocitats de rotació de la turbina. A la figura 6.4 es veu que en el cas d'estar controlada, la turbina assoleix un estat estacionari amb més rapidesa.

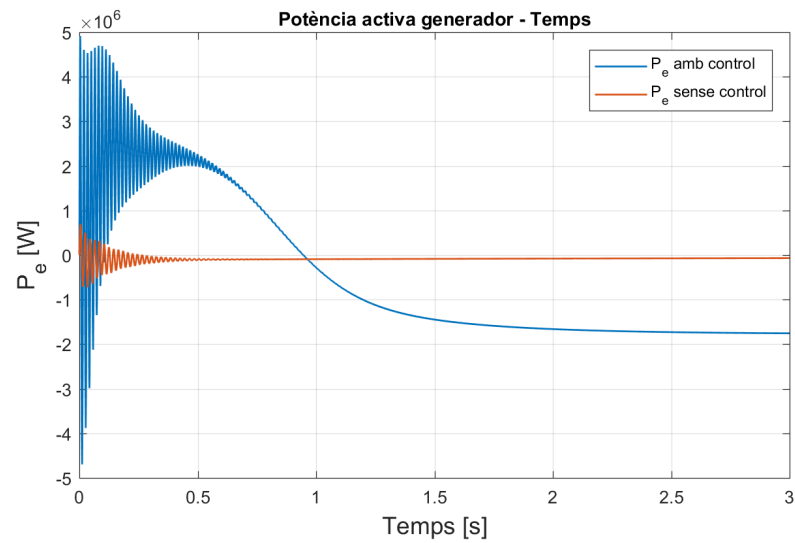


Figura 6.3: Comparativa de potències actives

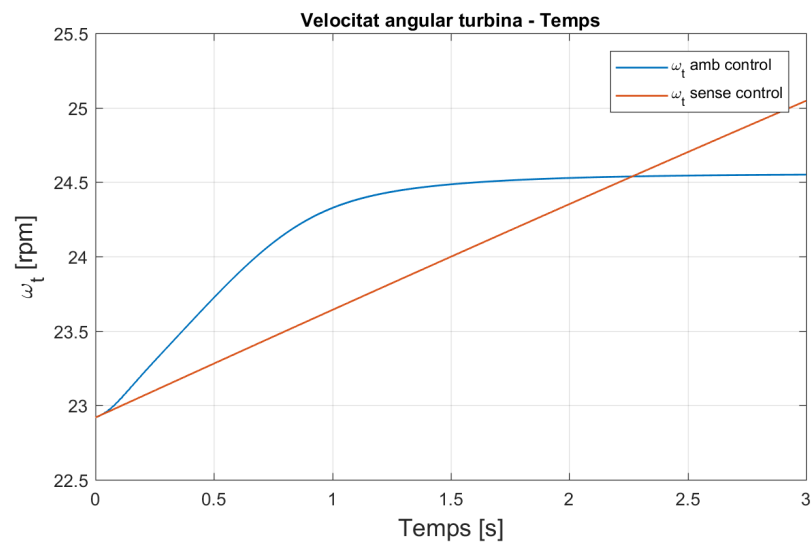


Figura 6.4: Comparativa de velocitats de rotació de la turbina

6.2 Anàlisi de l'aerogenerador amb velocitat del vent constant

En aquesta secció s'analitzarà el comportament de l'aerogenerador quan la velocitat del vent és constant per tal de comprovar que, en una situació poc exigent com aquesta, tots els components del sistema funcionen correctament.

L'estudi seguirà tot el flux d'energia que es va intercanviant des del movi-

ment de la turbina fins a l'injecció de corrent a la xarxa. Així doncs, s'aniran presentant els gràfics dels resultats més representatius començant per la turbina i acabant per la xarxa, seguint així l'ordre dels capítols 3 i 4.

La simulació s'ha realitzat a una velocitat del vent constant a 9m/s i amb una velocitat angular inicial de la turbina de 2,1rad/s. S'ha volgut realitzar aquesta simulació amb unes condicions de vent diferents a l'anterior per comprovar que l'aerogenerador no falla per a velocitats del vent diferents.

Així doncs, primer de tot es presenta el gràfic de la velocitat de rotació de la turbina, a la figura 6.5. Es pot observar que la turbina comença rotant a una velocitat superior a l'adequada per extreure la màxima potència de la màquina, i el control acaba corregint aquesta velocitat. A la figura 6.6 es pot veure el comportament de la velocitat de l'eix del motor, que és exactament el mateix però multiplicat per la relació de transmissió.

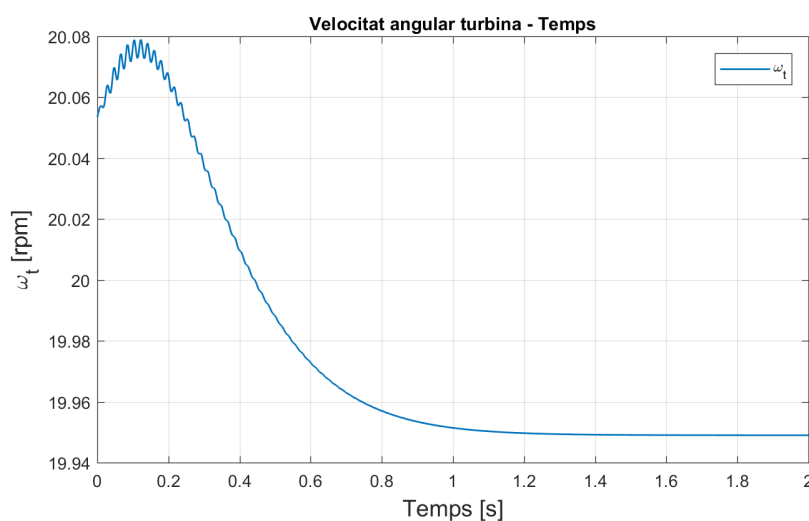


Figura 6.5: Velocitat de rotació de la turbina amb una v_{vent} de 9m/s

Es passa a analitzar el paràmetre λ conegut com a *tip-speed ratio*. Aquest valor, comparant-lo amb l'òptim que el calcula el control seguint l'equació 5.2, pot donar una idea de l'eficiència del control, ja que si és exactament o molt proper al λ_{opt} , la turbina estarà girant en condicions de màxim aprofitament de potència. El gràfic es presenta a la figura 6.7, i es pot veure que el valor real és molt proper al valor òptim, per tant la turbina està funcionant en unes condicions molt properes a les desitjades.

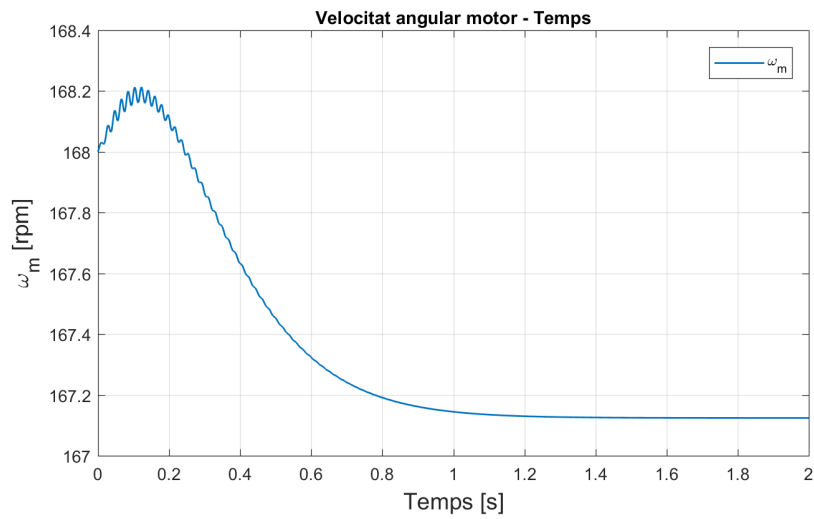


Figura 6.6: Velocitat de rotació del motor amb una v_{vent} de 9m/s

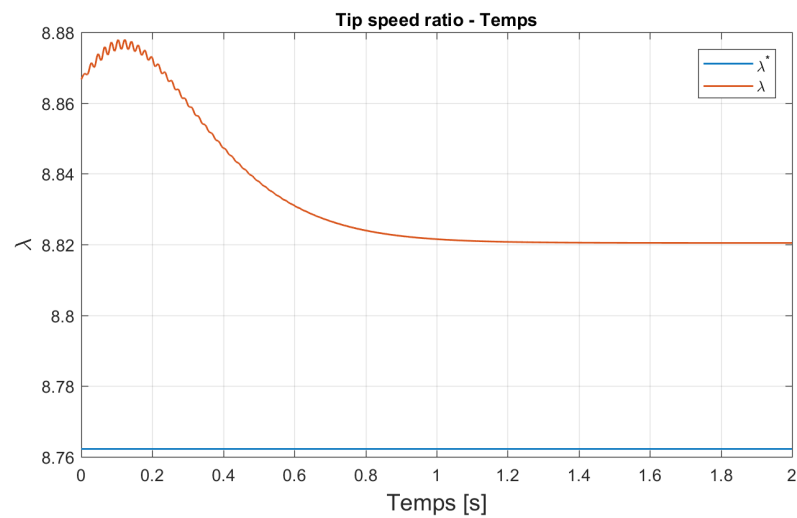


Figura 6.7: Comparativa de λ i λ_{opt} amb una v_{vent} de 9m/s

La potència elèctrica subministrada pel motor es pot veure graficada a la figura 6.8. Tal i com passava a la simulació de la secció anterior, la potència activa passa per un transitori que no s'estabilitza fins que la màquina assoleix una velocitat constant a l'estacionari. També cal dir que, a una velocitat de vent de 9m/s, el generador subministra menys potència que en condicions de 11m/s.

Un cop fet l'anàlisi del costat del generador, es passa a estudiar el convertidor *back-to-back*. Aquí, els paràmetres més significatius i interessants a estudiar són la intensitat DC que li entra pel costat del generador i, sobretot, la tensió del bus de contínua. Aquesta tensió s'hauria d'anar ajustant a la intensitat

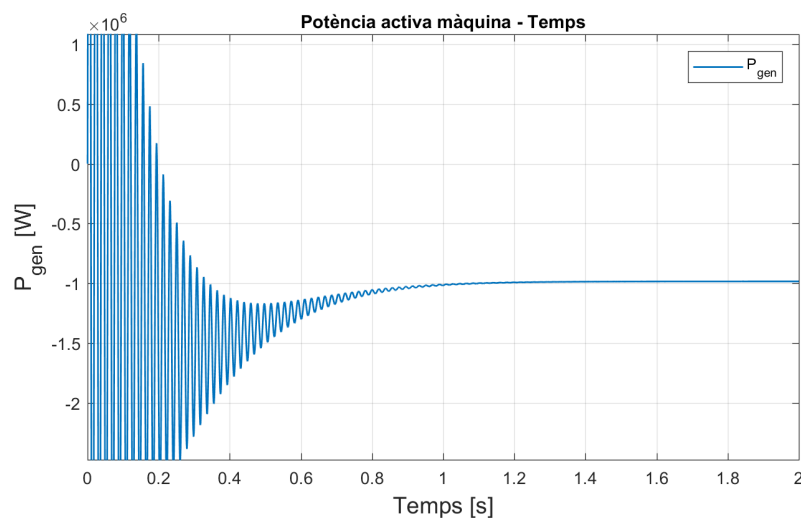


Figura 6.8: Potència activa subministrada pel generador a una v_{vent} de 9m/s

que entra pel costat de la màquina per tal d'assegurar el balanç de potència. Això vol dir que, en cas que la intensitat que entra disminueixi, les bateries del convertidor haurien de subministrar aquesta disminució del corrent. Per contra, si la intensitat augmenta, les bateries es carregaran. Això s'ajusta mantenint el voltatge del bus de contínua al voltant del valor consigna que el control del costat xarxa imposa al convertidor.

Primer de tot es presenta el gràfic de la intensitat DC procedent del generador i_{dcm} a la figura 6.9. Es pot veure que segueix una curva de l'estil de la potència activa generada a la màquina, i s'acaba estabilitzant a l'estat estacionari.

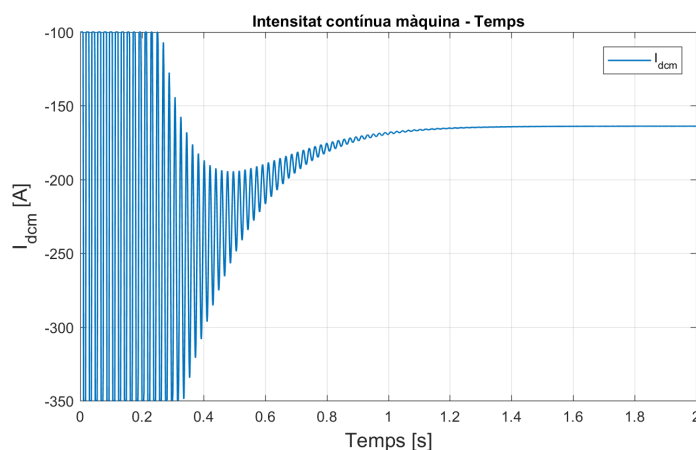


Figura 6.9: Intensitat DC al convertidor procedent del generador a una v_{vent} de 9m/s

A la següent figura 6.10, el gràfic representa la tensió del bus de contínua E_{DC} comparada amb el valor consigna que surt del control de la xarxa E_{DC}^* . Al transitori, el valor real oscil·la al voltant del consigna degut a la fluctuació de la intensitat, però al final es manté al valor desitjat, tot i que amb unes oscil·lacions molt petites.

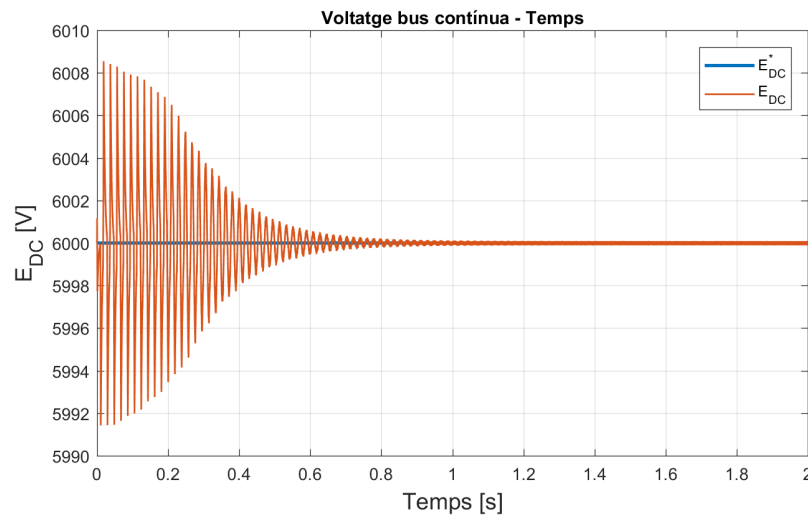


Figura 6.10: Tensió del bus de contínua del generador a una v_{vent} de 9m/s

Per entendre aquestes oscil·lacions, es pot recórrer al gràfic de la tensió que apliquen els IGBTs del convertidor. Aquests elements de commutació sempre provoquen un cert rissat als components voltatge i intensitat degut a que constantment estan canviant l'estat dels seus interruptors. Els gràfics de les figures 6.11 i 6.12 mostren la tensió v_l^{abc} i l'ampliació del seu rissat. L'elevada freqüència de commutació dels IGBTs i la inductància de la xarxa fan que aquest rissat sigui gairebé despreciable a efectes pràctics.

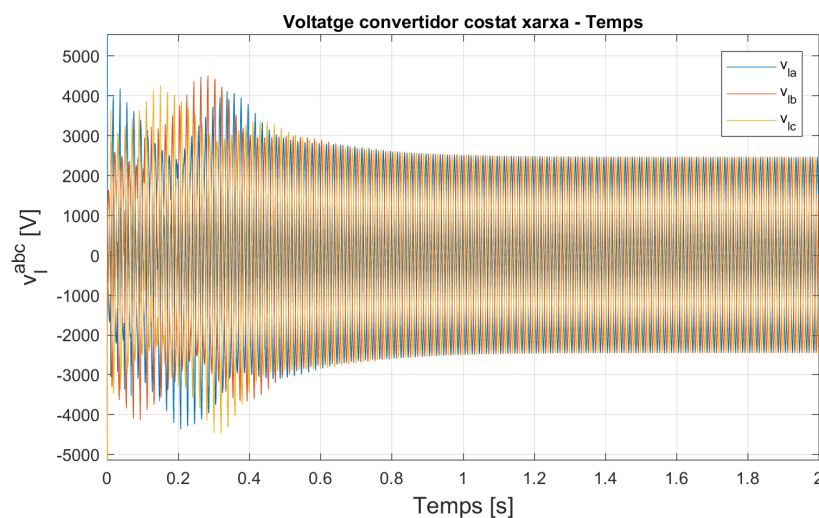


Figura 6.11: Voltatge al costat xarxa del convertidor a una v_{vent} de 9m/s

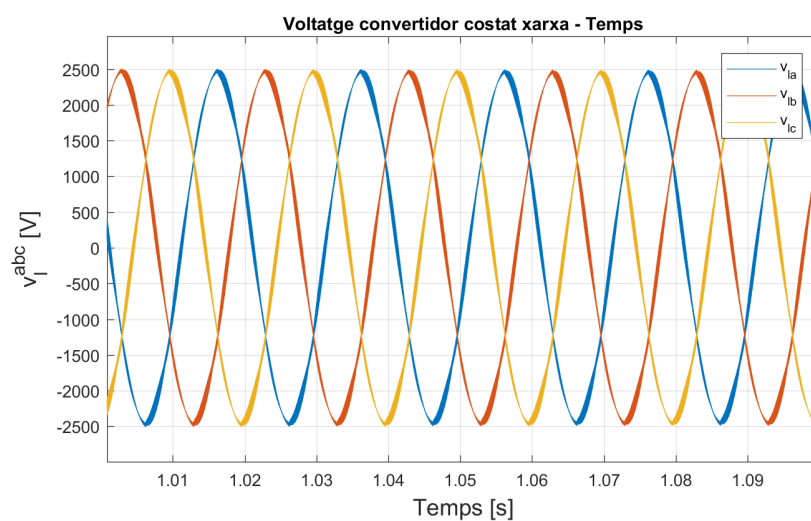


Figura 6.12: Voltatge al costat xarxa del convertidor ampliat a una v_{vent} de 9m/s

Un cop analitzat el convertidor, es passa a estudiar el comportament de la intensitat que s'acaba injectant a la xarxa. Primer es comprova que les intensitats en la referència $q d 0$ i_q i i_d són les que consigna el control del costat xarxa i_q^* i i_d^* . Aquesta comparativa es veu graficada a les figures 6.13 i 6.14. En aquests gràfics es pot comprovar que després del transitori, a l'estat estacionari els dos valors d'intensitat acaben tendint al valor consigna que es calcula al control del costat xarxa.

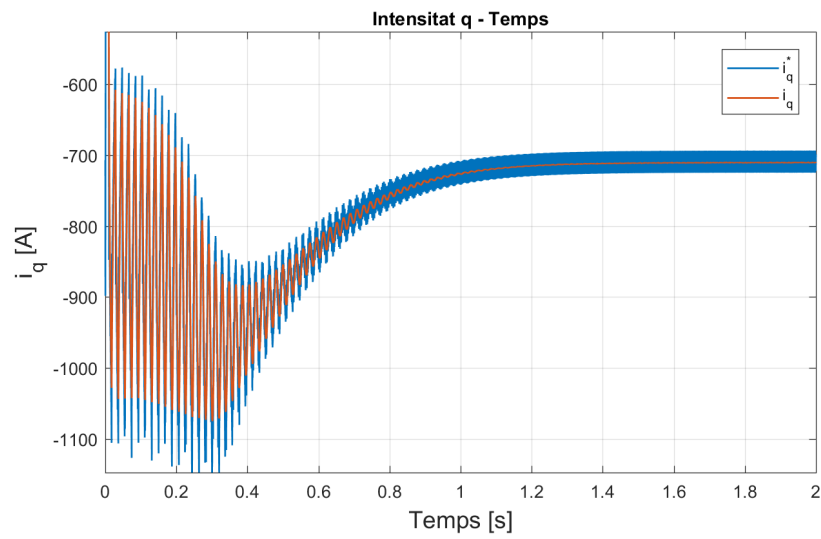


Figura 6.13: Comparativa d'intensitats i_q i i_q^* de la xarxa a una v_{vent} de 9m/s

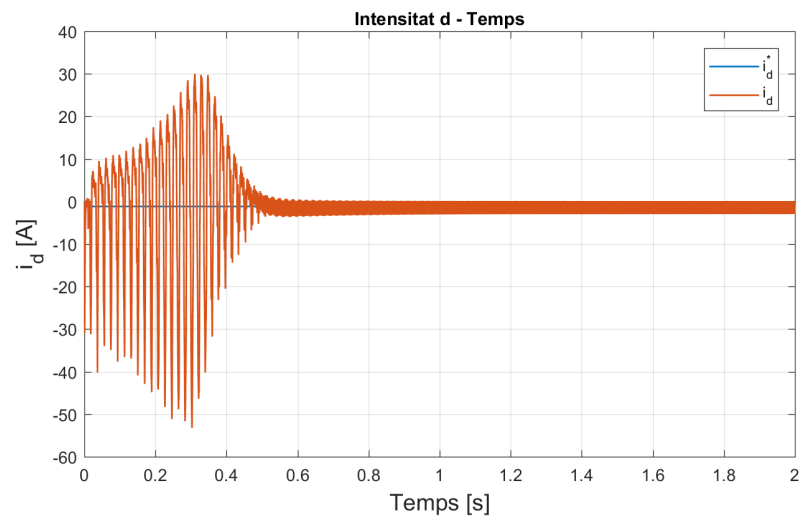


Figura 6.14: Comparativa d'intensitats i_d i i_d^* de la xarxa a una v_{vent} de 9m/s

Per tal de veure com es tradueixen aquests valors en la referència rotatòria $qd0$ a la referència trifàsica abc a través de la transformada inversa de *Park*, i comprovar que el rissat és mínim, es grafica el valor de les intensitats i_t^{abc} i una ampliació d'aquests a les figures 6.15 i 6.16. Aquests gràfics demostren que el comportament no surt de la normalitat i, en especial, es veu que el rissat de la intensitat es imperceptible.

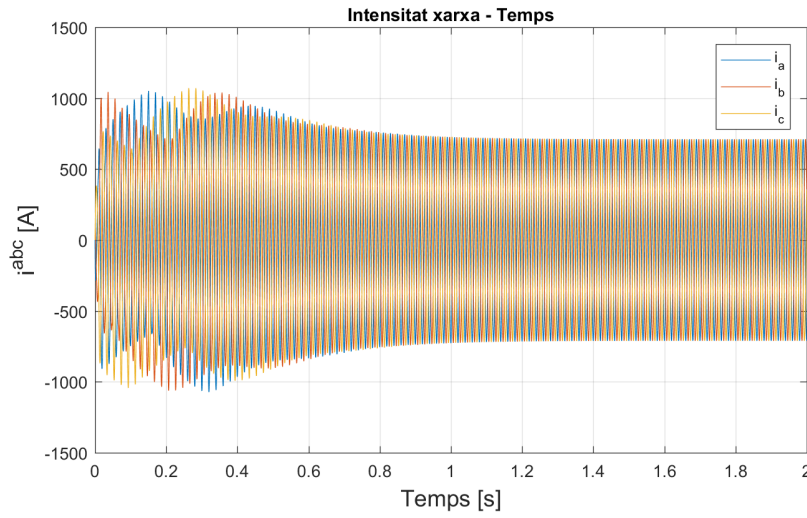


Figura 6.15: Intensitat injectada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s

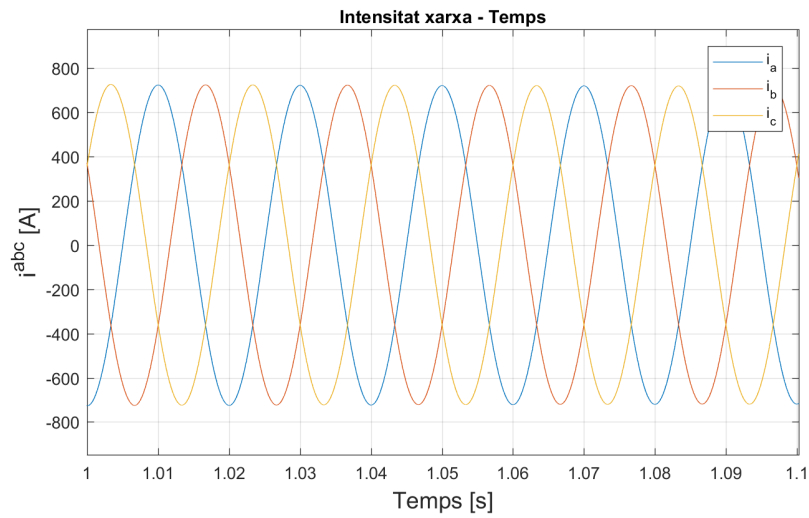


Figura 6.16: Intensitat injectada a la xarxa ampliada a una v_{vent} de 9m/s

Finalment, a la figura 6.17 es mostra la potència activa que es transmet a la xarxa a través del convertidor. Degut als rissats del voltatge, costa d'apreciar el valor mig d'aquesta potència, però recorrent al gràfic ampliat de la figura 6.18 es pot veure que el valor mig està al voltant de 1MW de potència, molt semblant a la potència aportada pel generador ja que s'han considerat les commutacions dels IGBTs ideals.

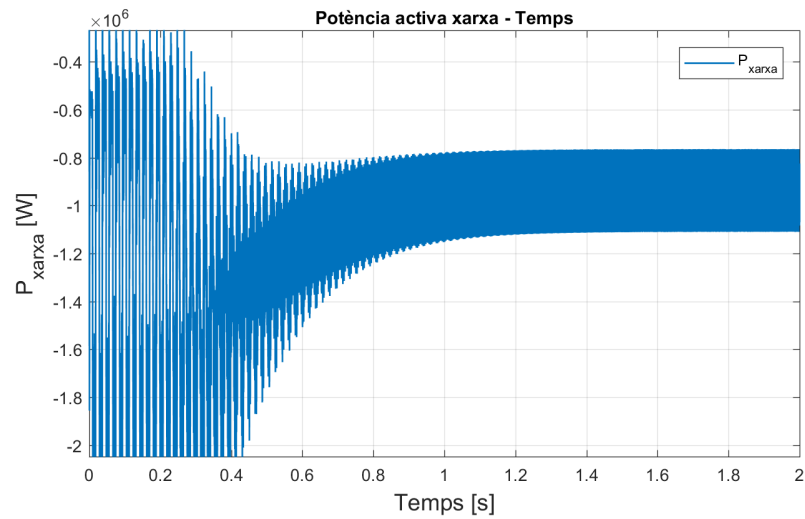


Figura 6.17: Potència activa aportada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s

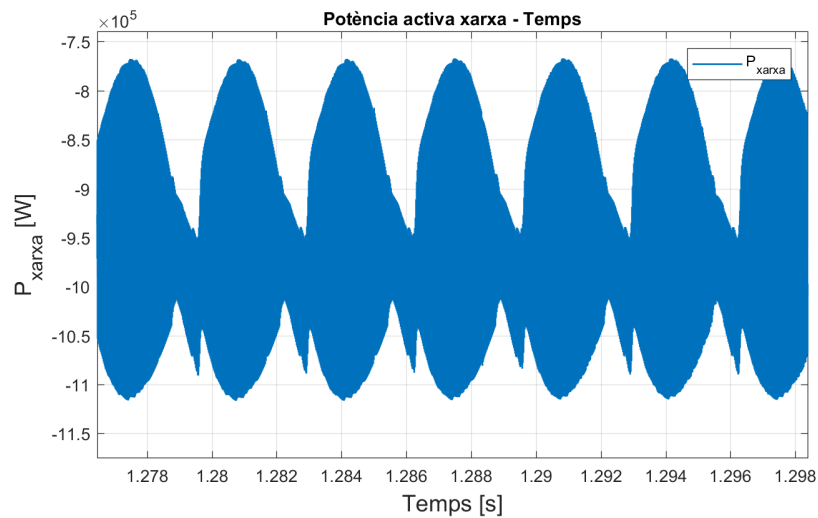


Figura 6.18: Potència activa ampliada aportada a la xarxa a una v_{vent} de 9m/s

6.3 Comportament davant un graó de vent

Aquesta última situació tractarà de recrear el comportament de l'aerogenerador davant d'un graó de vent que, als 2s de simulació, passa dels 9m/s als 10m/s. En aquest cas, la velocitat angular inicial de la turbina també serà de 2,1rad/s.

L'objectiu d'aquesta simulació és analitzar el transitori quan hi ha el canvi de la velocitat del vent, molt freqüent a la realitat, però les característiques del bloc de la màquina asíncrona del *Simulink* han dificultat molt aquesta tasca. Com ja s'ha vist a les anteriors simulacions, els estats transitoris que ofereix

el generador a nivell d'intensitat són molt bruscos, i les intensitats trifàsiques comencen en molts casos descentrades del 0. Això repercuteix en la potència activa de la màquina, i per tant, a la intensitat contínua que subministra la màquina al convertidor. Si aquesta intensitat oscil·lant a l'estat transitori, com s'ha vist a les simulacions anteriors, presenta pics d'amplitud molt elevada, les bateries del convertidor han d'estar carregant i descarregant-se constantment, i això també afecta a la tensió del bus de contínua. Quan això passa, el PI del regulador de voltatge del control del costat xarxa (veure sub-secció 5.2.2) ha de processar errors en la tensió del bus de contínua al quadrat $E_{DC}^{*2} - E_{DC}^2$ molt elevats, que comporten, al final de tot, generar un senyal de voltatge consigna v_l^* molt elevada que els IGBTs no poden assolir. Aquest fenomen fa que el voltatge consigna es dispari a valors exageradament grans.

La idea seria modelitzar a un nivell més bàsic, sense fer servir un bloc predefinit de la llibreria del *Simulink*, una màquina d'inducció de gàbia d'esquirol. Però aquests problemes han sortit a la fase final de l'estudi, i no ha estat possible aquesta implementació.

Finalment, per tal de tenir una idea de com seria l'estat estacionari abans i després del graó de vent, s'ha optat per aplicar un bloc de saturació a el senyal del bloc de la font de corrent controlada del convertidor (veure 4.8) entre 20A i 400A per tal que el sistema no es destabilitzi. Això el que comportarà és que l'estat transitori del convertidor i de la xarxa no serà representatiu de la realitat. Per contra però, permetrà estudiar els dos estacionaris i, també, l'estat transitori de la turbina i el generador.

Un cop explicades les condicions de la simulació, es procedeix a analitzar-la mitjançant gràfics seguint un recorregut molt semblant al de la secció anterior. Primer de tot es presenta el gràfic de la velocitat angular de la turbina ω_t a la figura 6.19.

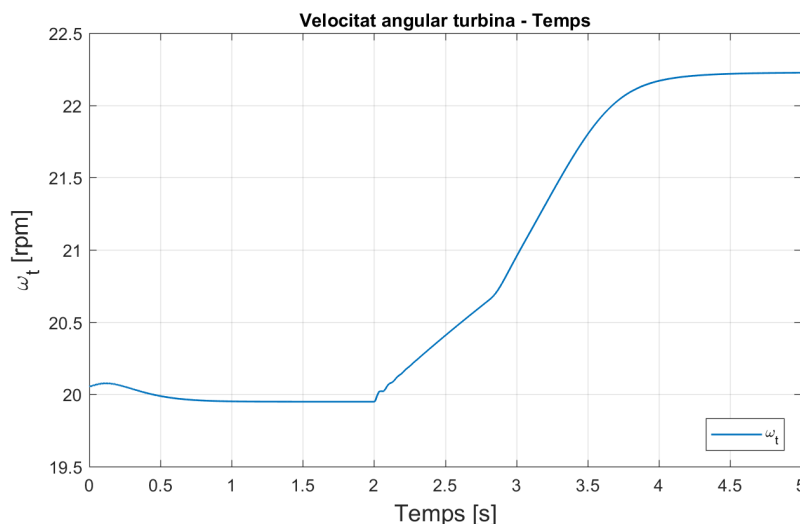


Figura 6.19: Velocitat de rotació de la turbina amb graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Es pot observar que, amb el graó de vent, la velocitat comença a augmentar

per tal d'assolir el punt òptim de treball, fins que finalment es torna a estabilitzar arribant a l'estat estacionari.

Per tal de veure si està treballant al punt òptim, es comparen els *tip speed ratios* λ i λ_{opt} durant la simulació. Els resultats es poden apreciar a la figura 6.20. Amb aquest gràfic, es pot arribar a la conclusió que el control realitza la seva feina, ja que just després del graó de vent, el *tip speed ratio* disminueix força, però tot seguit augmenta fins arribar a estar molt proper al desitjat.

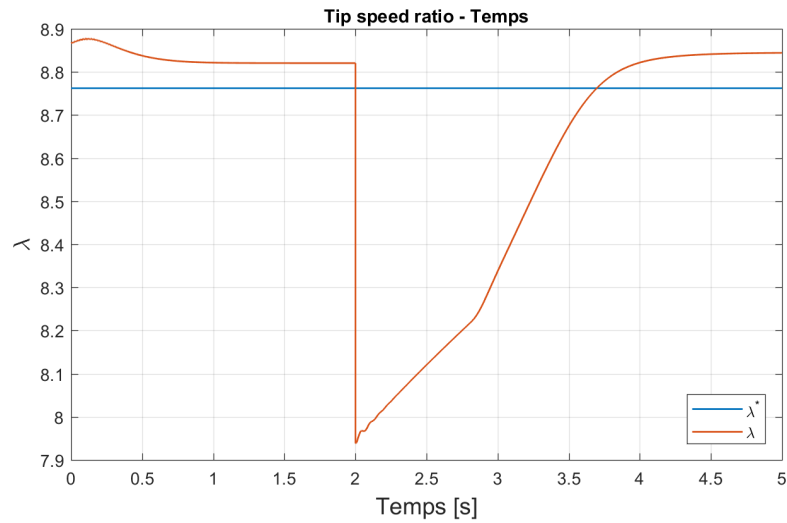


Figura 6.20: Comparativa de λ i λ_{opt} amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Per tal d'assolir aquesta λ_{opt} , el control ha consignat al convertidor que la freqüència elèctrica del voltatge que aplica a l'estator de la màquina v_s^{abc} augmenti tal i com mostra la figura 6.21.

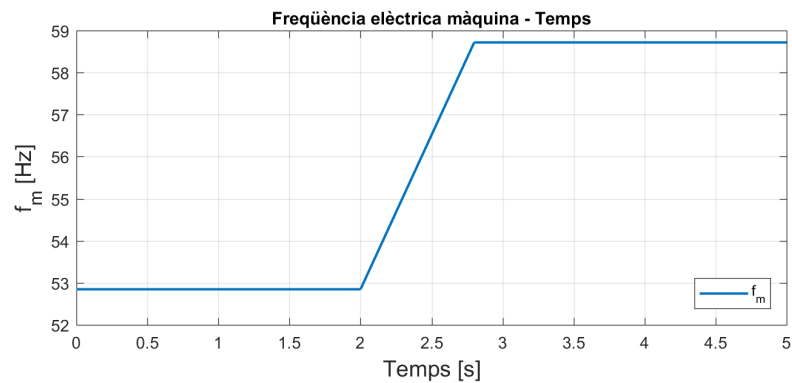


Figura 6.21: Freqüència del v_s^{abc} amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Es passa a analitzar la intensitat elèctrica que subministra el generador i_s^{abc} . La figura mostra el 6.22 gràfic en qüestió, on es pot observar que a la part final de la simulació acaba proporcionant una intensitat constant.

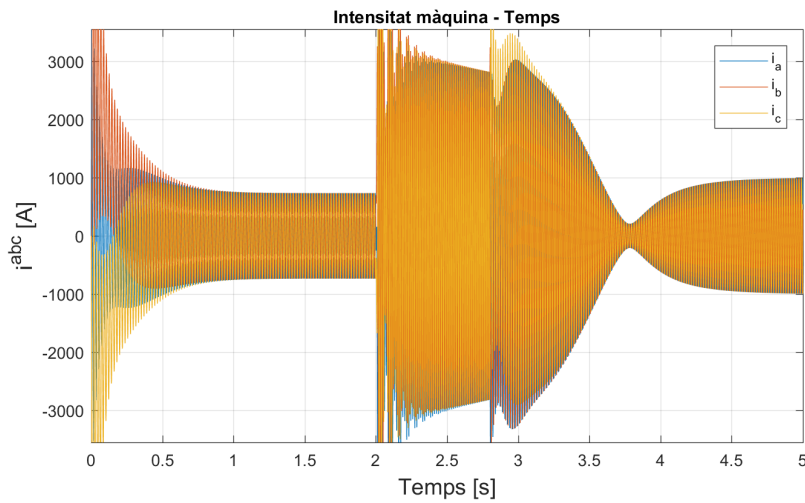


Figura 6.22: Intensitat de la màquina amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

El punt on hi ha un mínim en l'amplitud de la intensitat, al voltant dels 3,75s, fa pensar que la intensitat passa de ser positiva a negativa, degut a que la turbina ha hagut d'augmentar la velocitat per tal d'assolir el punt òptim de treball. Això es veu d'una manera clara amb el gràfic de la potència activa desenvolupada per el generador de la figura 6.23. Es veu clarament que en aquell punt passa a de ser positiva (consumeix) a ser negetiva (genera).

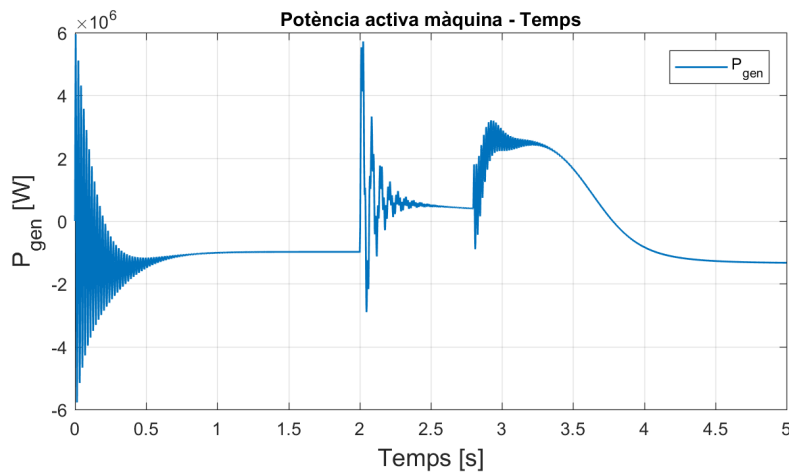


Figura 6.23: Potència activa de la màquina amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Un cop analitzat el comportament del generador, es passa a estudiar el convertidor, que com ja s'ha dit només es podrà tenir com a representatiu els dos estats estacionaris. La figura 6.24 mostra el gràfic de la tensió del bus de contínua E_{DC} , on es pot veure que en els dos estats estacionaris el voltatge és el

mateix que el consigna tenint en compte el rissat que provoquen els IGBTs.

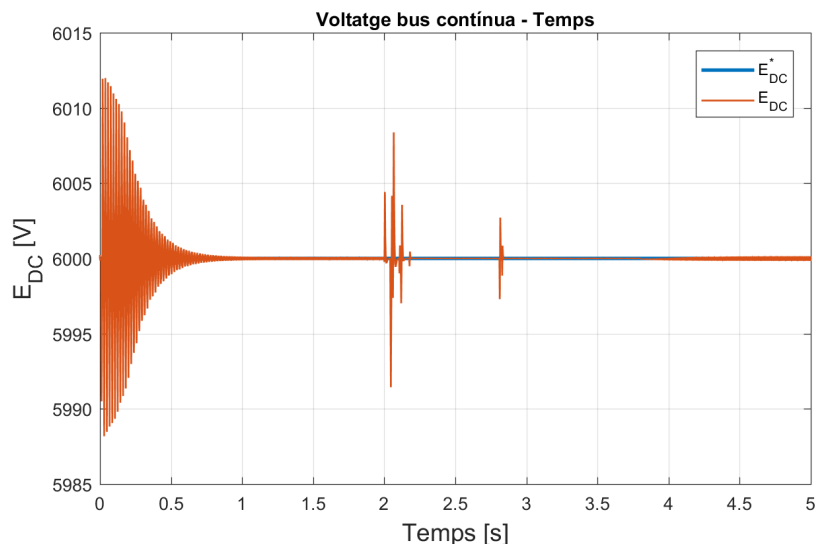


Figura 6.24: Tensió del bus de contínua amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Finalment, s'analitza el comportament de la xarxa utilitzant els gràfics de la intensitat que hi circula i_l^{abc} i de la potència que li subministra el convertidor P_{xarxa} .

El primer d'ells, que es troba a la figura 6.25, es pot veure com en els dos estats estacionaris la intensitat té un comportament normal amb amplituds constants. En el cas de les intensitats en la referència qd0 i_d i i_q , es pot veure als gràfic de les figures 6.26 i 6.27 que als estats estacionaris els valors reals segueixen els consignats.

Per últim, la potència activa lliurada a la xarxa pel convertidor es pot veure a la figura 6.28. En tots tres casos es pot comprovar que l'estat transitori no segueix un comportament lògic, condicionat pel bloc de saturació imposat a la intensitat del convertidor, ja que pel costat de la màquina s'està consumint energia de la xarxa, però, en canvi, al costat de la xarxa s'està consumint intensitat de l'aerogenerador. Això fa que, tot i que els resultats de l'estat estacionari són representatius, els de l'estat transitori no són satisfactoris i, per tant, en un futur s'haurà de millorar el model.

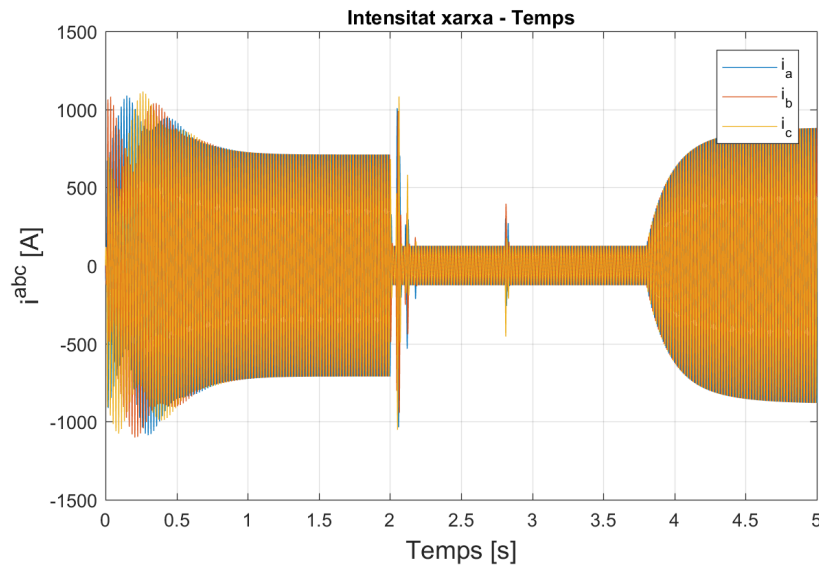


Figura 6.25: Intensitat de la xarxa un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

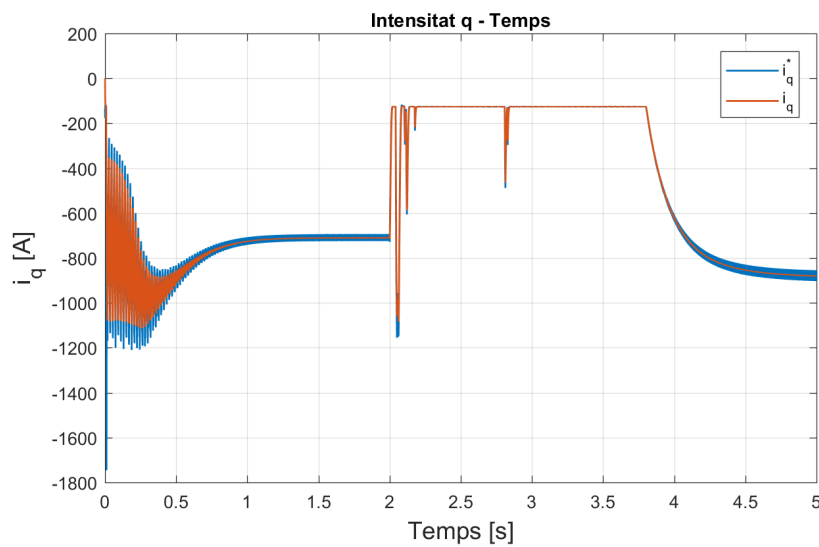


Figura 6.26: Comparativa d'intensitats i_q i i_q^* de la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

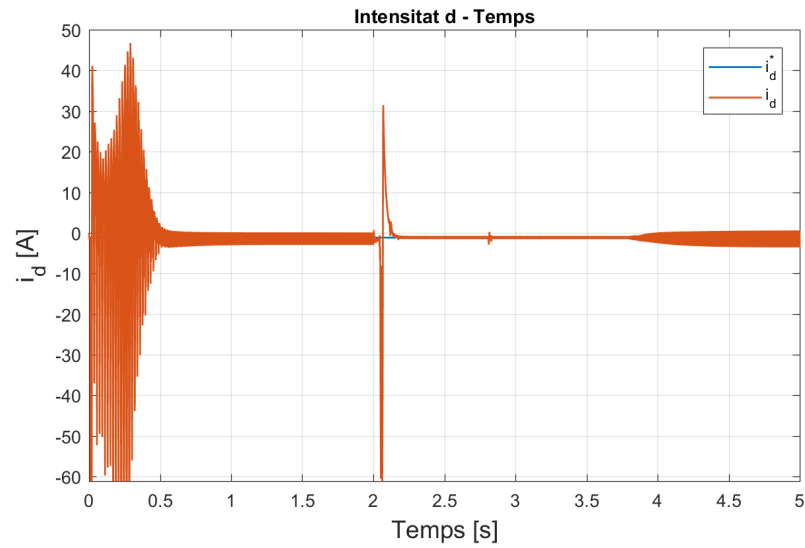


Figura 6.27: Comparativa d'intensitats i_d i i_d^* de la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

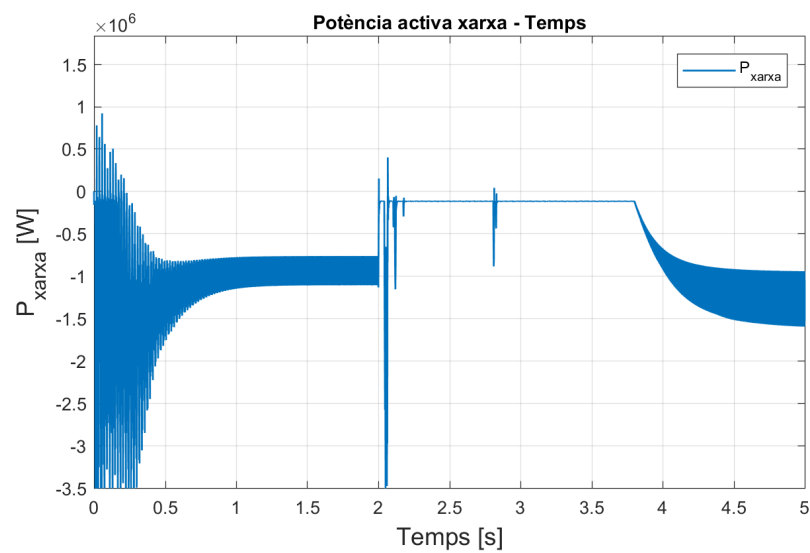


Figura 6.28: Potència activa injectada a la xarxa amb un graó de v_{vent} de 9m/s a 10m/s

Capítol 7

Impacte mediambiental

En aquest capítol s'ha estudiat l'impacte mediambiental dels aerogeneradors, tant els aspectes positius com negatius. Actualment, qualsevol projecte d'enginyeria ha de comptar amb un estudi d'aquestes característiques. El repte dual del canvi climàtic i la seguretat energètica obliguen a analitzar si el projecte portat a terme es pot convertir en realitat sense contribuir a l'empitjorament d'aquestes problemàtiques. L'estudi s'ha basat en els articles [12], [9] i [14].

Primer de tot es presentaran els aspectes positius d'utilitzar aquesta tecnologia relacionats amb el medi ambient. El principal avantatge pel qual s'utilitza aquesta energia és que no produeix gasos contaminants com fan altres fonts d'energia com el carbó, el gas natural o el petroli. L'energia eòlica es pot utilitzar per substituir les centrals tèrmiques convencionals construint granges eòliques de varis MW de potència. D'aquesta manera es redueixen considerablement les emissions de gasos com el diòxid de carboni, l'òxid de nitrogen i el diòxid de sofre, causants dels fenòmens coneguts com l'efecte hivernacle, l'augment del nivell del mar, la pluja àcida o els canvis bruscos del clima. Per altra banda, l'ús d'aquest tipus de font d'energia ajuda a reduir el l'elevat de combustibles fòssils, l'extracció dels quals es produeix en molts casos de forma massiva en mines que deterioren els ecosistemes que les envolten.

Un altre gran avantatge mediambiental que comporta utilitzar aerogeneradors com a fonts d'energia i que moltes vegades és el de la reducció del consum d'aigua. D'aquest fet no se'n sol parlar perquè sempre s'associa aquest tipus d'energia amb l'estalvi d'ús de combustibles fòssils. Però precisament per això, s'aconsegueix una disminució de l'ús d'aigua, ja que les centrals tèrmiques convencionals la utilitzen en grans quantitats per condensar el vapor del cicle termodinàmic que mou el generador d'electricitat. Així doncs, la instal·lació de granges eòliques també aportaria un estalvi d'aigua molt important.

Tot i el gran avantatge de tractar-se d'una energia "neta", l'energia eòlica també té característiques negatives pel medi ambient que s'han de tenir en compte a l'hora d'implementar aquesta tecnologia en segons quina zona geogràfica. Una de les més importants es tracta de l'efecte que té sobre la fauna de la zona en qüestió. Tot i que molts investigadors han arribat a la conclusió que l'energia eòlica és la més compatible amb els animals i els humans, s'ha trobat que té un impacte minoritari amb alguns animals. Aquest impacte es tracta bàsicament de col·lisions mortals amb les pales de la turbina, sobretot d'ocells. Tot i això, s'ha demostrat que aquesta incidència en la fauna es menor

que altres fonts d'energia, i que amb una bona planificació i disseny de la planta en zones on els ocells no hi freqüentin, l'impacte pot arribar a ser pràcticament nul. A més està demostrat que els ocells s'acaben adaptant als obstacles que es troben, i s'estan desenvolupant sistemes de protecció i prevenció per a aquests tipus de casos. També cal remarcar de manera especial que el canvi climàtic causa moltes més morts d'animals que no pas la instal·lació d'aerogeneradors.

L'altre punt negatiu en relació amb el medi ambient dels aerogeneradors és la contaminació acústica. El so d'una turbina es pot dividir en el mecànic, produït per el tren de transmissió i el generador elèctric, i l'aerodinàmic, produït pel flux de vent que passa per les pales de la turbina. Aquest segon soroll pot ser especialment molest per zones habitades properes ja que es tracta d'un so de molt baixa freqüència (molt greu), i costa molt d'evitar. En canvi, el so mecànic, amb un correcte manteniment de tots els elements de la turbina i un bon aïllament acústic es pot disminuir considerablement. Es per aquest motiu que les granges aerodinàmiques s'han de construir allunyades dels nuclis de població.

Per últim, cal explicar l'emissió indirecte de gasos d'efecte hivernacle dels aerogeneradors, d'aquí quan es parla d'energia "neta" es posa entre cometes. Com ja s'ha dit, aquesta energia ajudar a reduir en una enorme mesura els gasos contaminants emesos per els combustibles fòssils, però tot i així, la construcció d'aerogeneradors porta associat una generació indirecte de gasos d'efecte hivernacle. La producció de formigó i acer per als fonaments dels aerogeneradors en són els principals causants si es té en compte tot el procés d'obtenció d'aquests materials des de l'extracció fins al processament. També hi ha algunes teories que apunten que les turbines produeixen un petit canvi climàtic a nivell local degut al moviment de grans masses d'aire amunt i avall, però no són prou sòlides com per atribuir aquests fenòmens directament a les turbines eòliques.

Per concloure aquest estudi mediambiental, s'ha vist que l'energia eòlica és una energia que pràcticament no genera gasos contaminants i que s'adequa bé a l'ecosistema. S'ha vist que té alguns impactes negatius, però si estan dissenyades i planificades amb cura, molts d'aquests impactes es poden minimitzar i, globalment, es contribuirà a protegir el planeta del canvi climàtic i la contaminació atmosfèrica.

Capítol 8

Pressupost

En aquest capítol es desglossa el pressupost d'aquest estudi, que es divideix en el cost dels recursos informàtics i el cost dels recursos humans.

8.1 Recursos informàtics

La taula 8.1 mostra el pressupost desglossat dels recursos informàtics. S'ha considerat un període d'amortització de 6 mesos corresponent a la durada d'aquest projecte.

Concepte	Preu [€]	Cicle de vida [anys]	Amortització [€]
Microsoft Surface Pro	1500	4	187,50
Ratolí	30	4	3,75
Matlab 2017	0	-	0
Total	-	-	191,25

Taula 8.1: Pressupost dels recursos informàtics

8.2 Recursos humans

La taula 8.2 mostra el pressupost desglossat dels recursos humans. S'ha dividit el projecte en la fase d'estudi i disseny, la fase de simulacions i la fase de redacció de la memòria. Al final també s'aplica l'IVA corresponent.

Concepte	Preu [€/hora]	Temps [hores]	Cost total [€]
Estudi i disseny	40	140	5.600
Simulacions	40	160	6.400
Redacció	20	80	1.600
Subtotal	-	380	13.600
IVA (21%)	-	-	2.856
Total	-	-	16.456

Taula 8.2: Pressupost dels recursos humans

8.3 Cost total

La taula 8.3 mostra el cost total del projecte, tenint en compte els dos pressupostos descrits en aquest capítol.

Partida	Cost[€]
Recursos informàtics	191,25
Recursos humans	16.456
Total	16.647,25

Taula 8.3: Pressupost final

Capítol 9

Conclusions

En aquest projecte s'han descrit amb profunditat les equacions que defineixen el comportament dinàmic d'un aerogenerador d'eix horitzontal que utilitza un generador d'inducció de gàbia d'esquirol i un convertidor *back-to-back* per connectar-se a la xarxa. També s'ha dissenyat un sistema de control per al convertidor que és capaç d'extreure la màxima potència del generador d'inducció i, a la vegada, d'assegurar el balanç de potència entre la màquina i la xarxa regulant el voltage del convertidor.

Mitjançant l'anàlisi de les simulacions realitzades amb el *Simulink*, s'ha comprovat que tant el model mecànic com el model elèctric de l'aerogenerador funcionen correctament en estat estacionari. Tot i això, en els estats transitoris, el model de la màquina d'inducció utilitzat genera una potència activa que oscil·la amb valors de pic molt elevats, fet que provoca que el regulador de voltatge ordeni als IGBTs que apliquin un voltatge que no són capaccos d'aplicar. Per aquest motiu, el comportament de l'aerogenerador davant d'un graó de vent no ha estat l'esperat, i per tant s'haurà de modificar aquesta part del model per tal de poder estudiar amb detall els transitoris.

En un futur, per tal de millorar el model, es proposen les següents línies d'estudi, a part de la ja mencionada al paràgraf anterior. La primera seria acabar de completar el model del convertidor afegint els 6 IGBTs del costat de la màquina d'inducció incorporant un filtre LC per tal de tenir un model complet amb 12 IGBTs. Posteriorment, l'objectiu seria aplicar un control vectorial de llacç tancat al costat del generador d'inducció d'una manera semblant al control del costat xarxa, aplicant la transformada de *Park* i processant els errors de corrent mitjançant controladors PI. D'aquesta manera, s'arribaria d'una manera més precisa al punt de potència màxima. Finalment, també seria interessant estudiar el comportament de l'aerogenerador en una granja eòlica, on varis aerogeneradors d'aquest tipus es connecten conjuntament a la xarxa, i també quina és la seva resposta davant una fallada de tensió de la xarxa. Un cop realitzats tots aquests estudis, seria molt interessant construir un prototip d'aquest model.

Capítol 10

Agraïments

Primer de tot, voldria donar les gràcies a tot l'equip del CITCEA, que sempre m'han atès amb molt d'interès tots els dies que he anat a avançar el projecte al seu despatx. Vull agrair especialment a l'Oriol Gomis per haver-me donat la oportunitat de fer aquest treball en aquest centre, on hi he après moltíssim sobre energia eòlica i convertidors, i de ben segur que m'ajudarà de cares al meu futur professional. També vull donar les gràcies a l'Eduardo Prieto i a l'Enric Sànchez del CITCEA, que en més d'una ocasió la seva ajuda m'ha permès resoldre alguns problemes relacionats amb les simulacions.

Finalment, vull agrair el constant suport del meu pare, la meva mare i el meu germà. Des del primer dia que vaig començar el grau m'han estat recolzant i animant en aquest repte acadèmic, i n'estic convençut que si he arribat a fer aquest treball final, en part és gràcies a ells.

Bibliografia

- [1] Abid, M. U., Sajjad, T., NaiemArif, S. Z., Tayyab, M., and Ali, E. M. Mathematical modeling and speed torque analysis of three phase squirrel cage induction motor by using matlab/simulink.
- [2] Domínguez-García, J. L., Gomis-Bellmunt, O., Trilla-Romero, L., and Junyent-Ferré, A. (2010). Vector control of squirrel cage induction generator for wind power. In *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [3] Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A., and Gomis-Bellmunt, O. (2012). Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems. In *Modeling and control of sustainable power systems*, pages 47–81. Springer.
- [4] Eriksson, J. (2012). Dc to ac inverter card with igbts: Construction and performance.
- [5] Garcia, J. L. D. (2009). *Modeling and Control of Squirrel Cage Induction Generator with Full Power Converter Applied to Windmills*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona. Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona. Mobilitat, 2009 (Enginyeria Industrial).
- [6] Islam, M. R., Guo, Y., and Zhu, J. (2013). Power converters for wind turbines: current and future development. *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments. Energy Book Series-2013 edn. Spain*, pages 559–571.
- [7] Junyent Ferré, A. (2007). Modelització i control d’un sistema de generació elèctrica de turbina de vent.
- [8] Kohlrusz, G. and Fodor, D. (2011). Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 39(2):265–270.
- [9] Leung, D. Y. and Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1):1031–1039.
- [10] Muller, R. A. (2008). *Physics for future presidents: The science behind the headlines*. WW Norton & Company.

- [11] Saad, M. M. M. and Asmuin, N. (2014). Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 4(08):27–30.
- [12] Saidur, R., Rahim, N., Islam, M., and Solangi, K. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(5):2423–2430.
- [13] Soter, S. and Wegener, R. (2007). Development of induction machines in wind power technology. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International*, volume 2, pages 1490–1495. IEEE.
- [14] Wang, S. and Wang, S. (2015). Impacts of wind energy on environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:437–443.